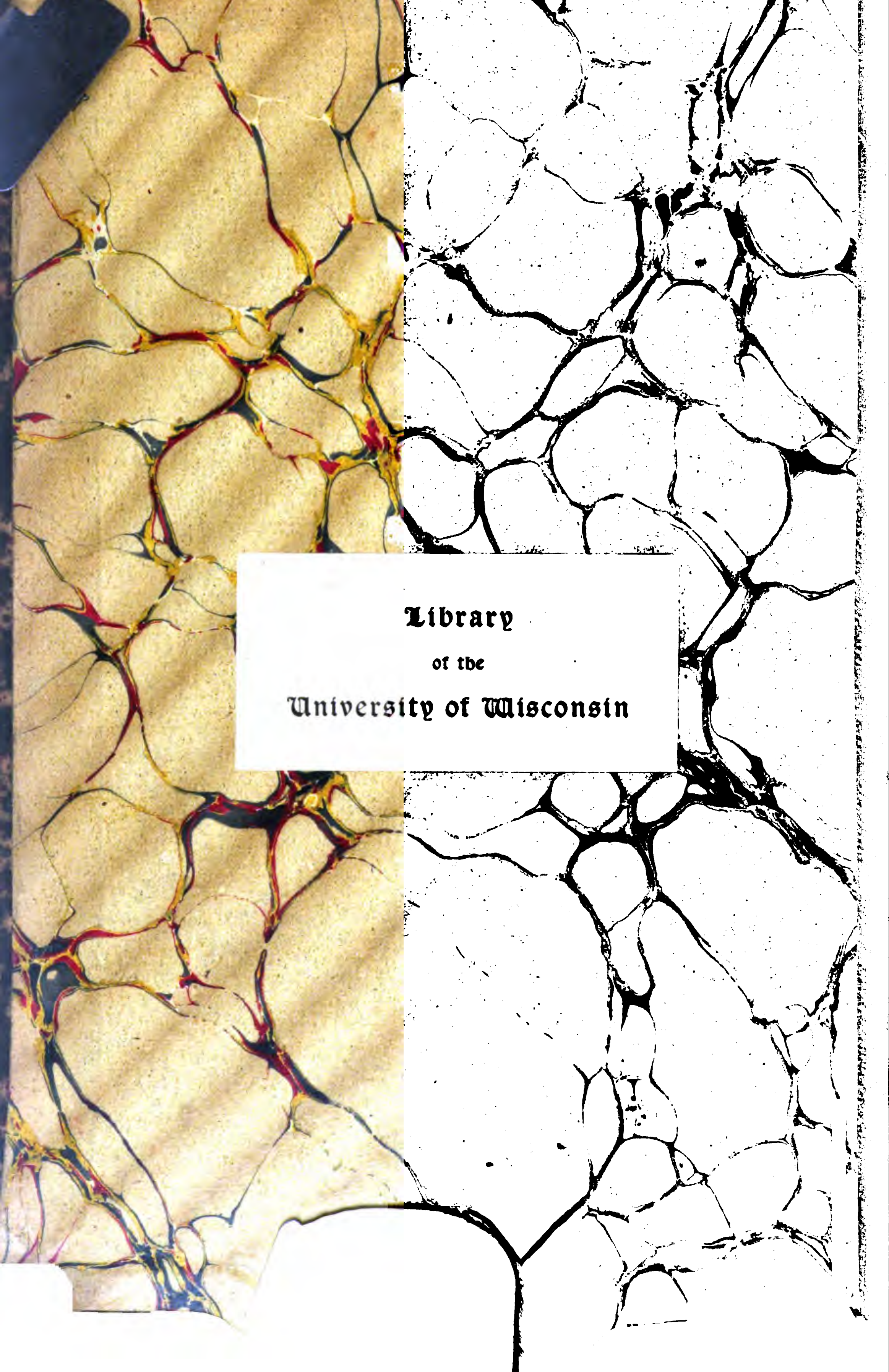
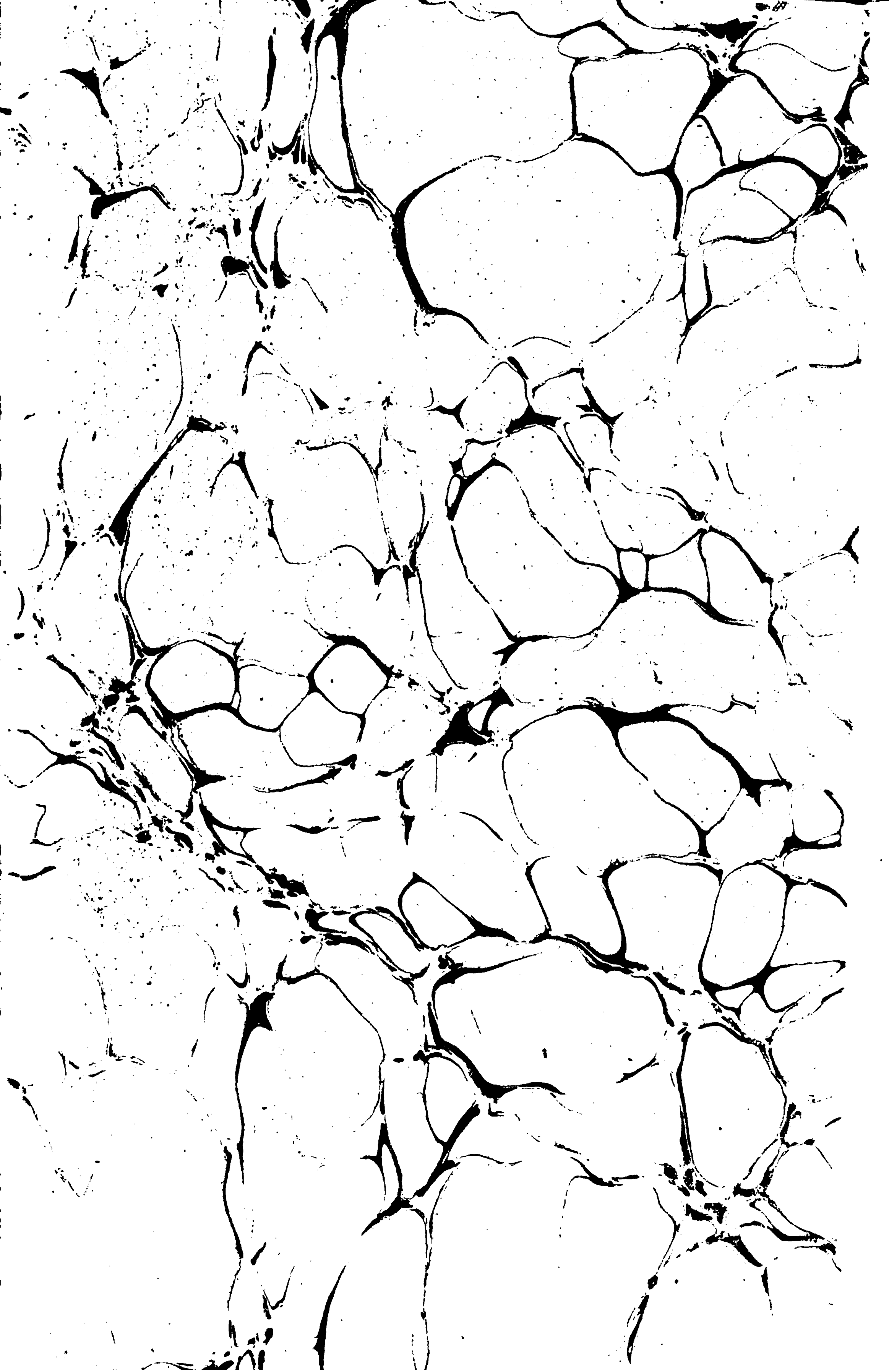
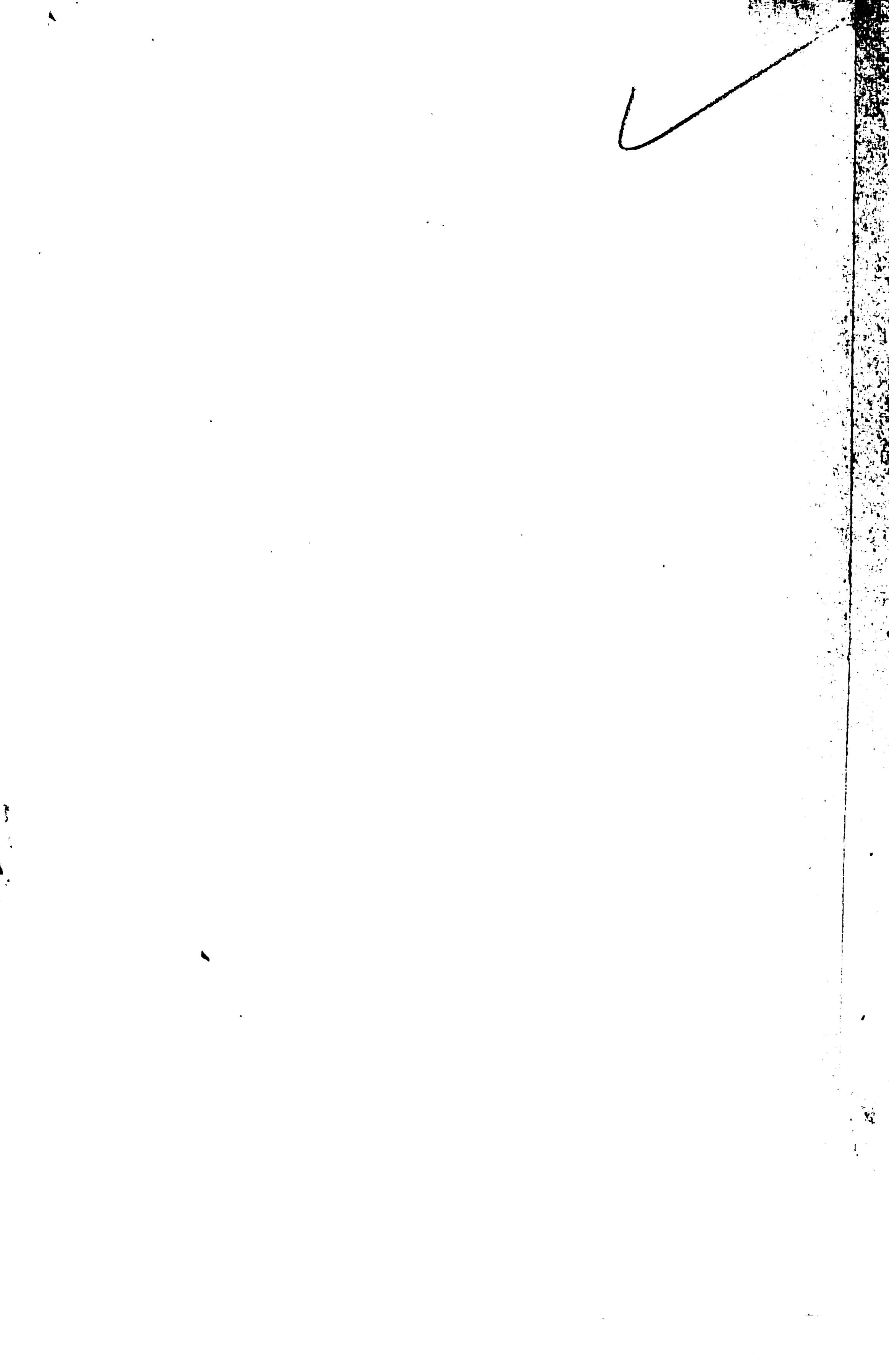






LES

TURBO-MOTEURS

ET LES

MACHINES ROTATIVES

COURBEVOIE

IMPRIMERIE E. BERNARD

14, RUE DE LA STATION

BUREAUX A PARIS : 29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS

LES
Turbo-Moteurs
ET LES
MACHINES ROTATIVES

PAR

H. DE GRAFFIGNY

INGÉNIEUR CIVIL
AUTEUR DE LA « PETITE ENCYCLOPÉDIE ÉLECTRO-MÉCANIQUE »
RÉDACTEUR A LA « REVUE TECHNIQUE »



PARIS
E. BERNARD, IMPRIMEUR-ÉDITEUR
29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 29

1904

LES TURBO-MOTEURS ET LES MACHINES ROTATIVES

(VENT, EAU, VAPEUR ET GAZ TONNANTS)

CHAPITRE PREMIER.

Considérations générales sur les machines tournantes en tous genres.

L'une des préoccupations les plus constantes des constructeurs et des industriels, à notre époque, consiste, en matière de mécanique, à simplifier autant que possible tous les organes des machines, de manière à en réduire constamment le poids et le volume et tout en s'efforçant d'atteindre un rendement de plus en plus élevé. Grâce à une expérience péniblement acquise, on a pu établir des formules mathématiques précises et déterminer d'avance, avec une remarquable approximation, les dimensions des pièces mécaniques, suivant l'effort qu'elles auront à supporter. Les aléas inhérents à toute conception nouvelle sont ainsi très diminués et l'on peut aller de l'avant avec beaucoup plus d'assurance qu'autrefois, la théorie s'étant enrichie et complétée sur bien des points, en s'appuyant sur les découvertes multipliées de la science expérimentale.

Si nous prenons comme exemple, entre cent autres, le moteur

à vapeur, nous reconnaîtrons que, durant plus d'un demi-siècle, les constructeurs se sont bornés à établir leurs appareils sans règles bien précises, en améliorant seulement les détails de l'agencement des divers organes constitutifs. Mais peu à peu, la science de l'ingénieur progressant et utilisant les remarques pratiques faites sur les dispositions et le rendement des différents types ayant donné de bons résultats, des intelligences supérieures ont coordonné toutes ces données éparses et établi des règles mathématiques, des proportions et des formules qui ont permis d'élucider les divers phénomènes constatés dans le fonctionnement des machines. A partir de ce moment, les progrès se sont multipliés et affirmés : on a donné des formes et des dimensions rationnelles à chaque organe, et amené petit à petit l'ensemble des mécanismes à un point qu'il semble difficile de dépasser.

Et la même transformation s'est produite pour une foule d'autres appareils, tels que le moteur à gaz détonant, les machines à élever l'eau, à travailler le bois et les métaux, etc. La dynamo, cet admirable outil de production de l'énergie, a commencé par être un objet disgracieux, lourd et grossier, dont le fonctionnement restait mystérieux pour le plus grand nombre. Avec le temps, on s'est rendu un compte de plus en plus exact des phénomènes complexes d'où résultait la formation du courant électrique ; en tâtonnant, en utilisant une intuition plus heureuse, on a édifié des modèles moins imparfaits, enfin, à l'empirisme de génie des premiers inventeurs, a succédé l'inflexible logique du raisonnement mathématique, et, aujourd'hui, on peut calculer, avec une rigueur qui ne sera pas démentie à l'exécution, le rendement que fournira une dynamo de dimensions données, toutes les obscurités anciennes ayant disparu avec l'ignorance, l'incompréhension du début.

Le chercheur a donc maintenant moins de déboires à redouter qu'autrefois. Pour ajouter un nouveau chaînon à la longue suite des découvertes humaines, il peut prendre un point d'appui efficace sur les inventions précédentes, et quand on possède l'utile levier du calcul transcendant, on peut se rendre compte en partie, si la machine rêvée pourra donner le résultat espéré. Certes, l'expérience est souveraine, c'est par elle qu'ont commencé toutes les applications scientifiques qui sont entrées aujourd'hui dans le domaine courant, mais maintenant que toutes les conditions du

fonctionnement des machines ont été étudiées jusque dans leurs moindres détails, la théorie est fondée sur des bases inébranlables et devient indispensable pour scruter préalablement la possibilité de la solution d'un nouveau problème. Que d'argent, d'efforts, d'espoirs ont été gaspillés inutilement dans des essais frappés d'inutilité dès leur conception, et qui auraient pu être évités en recourant aux lumières de l'expérience, à la théorie dédaigneusement rejetée et qui condamnait d'avance ces tentatives infructueuses!...

Pour en revenir au sujet que nous nous proposons de traiter dans le présent ouvrage, nous voyons que ces considérations s'appliquent justement aux machines tournantes de toute espèce. Bien que le champ des découvertes soit, en réalité, illimité, il paraît restreint quand on songe à la somme formidable d'inventions, de recherches avortées et qui élèvent une barrière insurmontable devant l'avenir. Que de conquêtes nous paraissent impossibles, à l'heure actuelle, irrévocablement condamnées qu'elles sont par l'intransigeante théorie, et qui, sans doute, sont le patrimoine de demain! N'oublions pas que, dans l'ordre des conquêtes scientifiques comme dans tout autre ordre d'idées, il faut que l'ensemble évolue et progresse peu à peu parallèlement. Pour qu'une découverte produise ses fruits, il faut que l'état des esprits et des connaissances acquises s'y prête, au lieu de constituer une barrière, un mur infranchissable. N'est-ce pas le cas pour la navigation aérienne entre autres?...

De même, les machines tournantes semblent avoir atteint leur apogée et l'on ne devine pas ce que pourra être le moteur de demain qui rejettera dans l'oubli nos admirables machines à vapeur ou à gaz tonnants. Tous les principes physiques semblent connus, disséqués jusque dans leur essence, et incapables de contenir des applications supérieures à celles réalisées. Et cependant combien de mystères, ils recèlent encore, et combien il est facile et vraisemblable de supposer que l'avenir nous réserve encore mille surprises de toute espèce!

Quoi qu'il en soit, il est bon de montrer quel chemin a été parcouru depuis le début, et résumer, en un tableau fidèle et impartial, l'état d'une question à une époque déterminée de l'histoire. Il n'est pas une variété de machines sur laquelle l'ingéniosité des inventeurs se soit autant exercée que sur les machines fournis-

sant un mouvement de rotation direct sans transformation, sans intervention d'organes de transmission : bielles, balanciers, excentriques, etc. Et malgré des tentatives cent fois renouvelées, le succès final n'a pas récompensé ce labeur ingrat ; au commencement du vingtième siècle, la machine rotative demeure sinon un mythe, au moins un appareil inférieur industriellement au moteur à piston à mouvement alternatif, celui-ci étant mieux connu, les phénomènes secondaires qu'il présente ayant été analysés dans leurs manifestations même les moins apparentes.

Le problème est séduisant en vérité : obtenir directement, sans artifices compliqués de cinématique, le mouvement circulaire continu désiré, sans changement ou inversions brusques et continuelles d'effort et de pression, par une rotation régulière sans choc et sans à-coups, aussi s'explique-t-on sans peine pourquoi les inventeurs ont essayé à maintes reprises de réaliser un appareil répondant à ces conditions,car ils pouvaient ainsi espérer réduire à l'extrême la complication des organes de distribution, de régularisation et de transmission de la force développée. Mais ils se sont butés à une difficulté dont la gravité était insoupçonnée : l'étanchéité des joints entre le tambour-piston et la boîte le contenant. Toujours la consommation de fluide a été supérieure, à travail égal, à ce qu'elle est dans une machine à piston, et l'on peut dire que, tant que cette difficulté n'aura pas été vaincue et le rendement amélioré, la machine rotative ne saurait lutter victorieusement contre le système à piston, lequel consomme moins de vapeur par unité de puissance.

Cette remarque ne s'applique pas, nous nous empressons de le dire, aux moteurs utilisant le principe de la force vive d'un fluide en mouvement et qui ont conquis de haute lutte, au cours de ces dernières années une place enviable dans l'industrie. Les *turbomoteurs*, ainsi qu'on les appelle couramment, leur organe principal étant une roue à aubes ou une turbine, peuvent entrer en concurrence avec les bonnes machines à piston à détente, au point de vue de la consommation de vapeur. Ce point primordial, en notre temps où la question d'économie prime toutes les autres, étant établi, il est incontestable que, pour un grand nombre d'applications, la turbine à vapeur présente d'indéniables avantages. Son allure étant rapide permet l'accouplement direct avec les outils ou appareils à commander, les trépidations dues aux change-

ments de sens des efforts subis par les pièces tournantes à chaque demi-tour sont réduites aux minimum, puisqu'il n'y a plus de bielle ou de balancier, enfin on peut dire qu'elle fournit une solution heureuse, vainement cherchée jusqu'alors avec les machines rotatives proprement dites.

La roue paraît, en effet, constituer un organe mécanique supérieur au piston, quel que soit le fluide employé pour l'actionner. Si nous prenons d'abord le vent, nous verrons que le moulin à quatre ailes torses, délaissé depuis le triomphe de la machine de Watt, a retrouvé une vogue nouvelle du jour où l'on s'est avisé de lui donner la forme d'une roue à palettes d'une forme déterminée, utilisant le moindre souffle atmosphérique, et d'en faire une turbine aérienne à orientation, réglage et graissage automatiques. Des milliers de ces moulins perfectionnés sont installés dans tous les pays : leur utilité est incontestable, puisqu'ils permettent d'utiliser une puissance naturelle illimitée et gratuite, restée jusqu'alors un peu dédaignée en raison de son inconstance. Ils sont surtout appliqués à l'élévation des eaux, mais on commence également à leur faire commander des autres outils agricoles et même des dynamos pour la production de l'éclairage électrique.

L'eau des rivières et des torrents, cette autre force naturelle gratuite, la *houille blanche*, comme certains l'ont appelée, a été captée, canalisée adroitement et c'est encore dans les aubes de la turbine qu'elle donne son maximum de puissance.

Les anciennes roues hydrauliques, à palettes, aubes ou augets, atteignaient des dimensions gigantesques pour ne donner qu'une force restreinte, avec un rendement très variable suivant la hauteur des eaux motrices. On conçoit donc que la turbine ait attiré l'attention des ingénieurs, et que ceux-ci soient parvenus, après de laborieux travaux à rendre cette turbine très supérieure à tous égards à l'antique roue à eau. Là encore, la théorie mathématique est venue en aide à l'expérience pour l'analyse et la détermination de la forme des organes constitutifs, rien n'a été laissé au hasard, tous les phénomènes ont été élucidés, et le résultat final est que la perfection presque absolue a été atteinte et qu'il semble impossible de faire mieux désormais en cet ordre d'idées.

Où le champ reste encore presque inexploré, où les investigations sont susceptibles d'amener des trouvailles inespérées, c'est dans le domaine des moteurs rotatifs à gaz tonnants. Déjà l'ima-

gination des inventeurs s'est portée sur ce point, en raison du développement prodigieux pris tout d'un coup par le moteur léger à pétrole, et les dernières expositions nous ont montré quelques spécimens de turbo-moteurs à mélange tonnant. Mais aucun n'a fourni la formule définitive et il reste encore bien des expériences à effectuer avant de doter l'industrie d'un outil de valeur égale au moteur à pétrole à piston, maintenant si répandu en raison de sa simplicité et de son économie.

Il y avait donc, à notre avis un livre intéressant à écrire pour montrer l'état de la question des moteurs rotatifs de toute espèce au début du vingtième siècle. C'est ce tableau comparatif que nous avons esquissé dans les pages qui suivent et où les turbo-moteurs à vent, à eau, à vapeur, à gaz tonnants, sont étudiés dans cet ordre.

Un chapitre a été réservé, pour terminer, aux machines dérivant directement des turbines, telles que les pompes centrifuges, les ventilateurs, les écrémeuses, etc. et contient toutes les données techniques qu'il peut être utile de posséder sur ces différents appareils.

Ainsi composé, nous pensons que ce volume forme un tout complet et que, malgré ses imperfections, il résume les connaissances qu'il est utile de posséder sur cette classe importante de machines. Il pourra donc rendre quelques services aux mécaniciens et aux inventeurs, et c'est sur cet espoir que nous entrons immédiatement dans notre sujet.

CHAPITRE II

Les turbo-moteurs atmosphériques

Si les anciens moulins à vent, spécialement construits pour la mouture du blé ou la fabrication des huiles diminuent avec une rapidité qui fait prévoir leur disparition totale à bref délai des campagnes qu'ils ornaient, et sont remplacés par des minoteries actionnées par des moteurs mécaniques à vapeur ou à gaz tonnants, il n'en est pas moins incontestable que des moteurs à vent plus perfectionnés prennent chaque jour de nouveaux développements, principalement pour l'élévation des eaux et la commande de divers outils d'agriculture.

Ces deux conditions, qui paraissent contradictoires, sont cependant d'une réunion facile. Les anciens moulins à vent à quatre ailes rendaient en effet des services bien chèrement acquis au pauvre meunier, qui devait attendre patiemment que le vent voulût bien souffler avec assez de force et de constance pour moudre les sacs de blé que des clients impatients réclamaient à grands cris, tandis qu'à d'autres moments il enrageait en voyant son moulin tourner avec frénésie, alors que les sacs vides ne réclamaient aucun travail. Si, dans ce cas particulier, des moteurs plus réguliers, comme l'eau et la vapeur fournissent des résultats meilleurs, il n'en demeure pas moins vrai que, pour certaines applications, le vent peut rendre de très réels services, à la condition de faire usage de mécanismes étudiés spécialement pour son utilisation.

Les premiers moulins *automoteurs,* comportant comme organe principal de mouvement, une véritable roue-turbine, au lieu de quatre ailes disposées en croix, remontent à l'année 1830, et ont été proposés pour la première fois par M. Amédée Durand, qui

effectuait le réglage en proportionnant la surface des aubes opposées au vent à la vitesse de celui-ci. Cette idée féconde a été reprise par de nombreux mécaniciens qui l'ont améliorée et amenée presque à la perfection. A l'époque actuelle, les turbines aériennes sont très en faveur, aussi bien en Europe qu'en Amérique, et parmi les constructeurs qui ont étudié des modèles intéressants nous devons citer MM. Vidal-Beaume, Durey-Sohy, Anceaux, Plissonnier, Schabaver entre autres.

Un système intéressant était la *turbine atmosphérique* qui fut construite vers 1885 par M. Dumont. La forme donnée aux ailes (celles-ci-étaient au nombre de quatre ou de six, suivant le diamètre) affectait celle d'une spirale, dont la surface allait croissant. Cette disposition devait avoir le grand avantage d'utiliser les moindres bouffées d'air, et le moulin devait tourner presque continuellement. Mais, en revanche, cet agencement devait avoir certains inconvénients non sans gravité car ce système n'a pas tardé à disparaître et n'est plus employé maintenant.

D'après le constructeur, pour utiliser toute la force du vent, il est nécessaire que le volume d'air, agissant par pression, s'écoule avec la même vitesse en tous les points de la surface de la voilure. La forme adoptée pour chaque aile est celle d'une surface gauche héliçoïdale.

Une application, entre autres, de ce système a été faite en 1873 pour l'alimentation d'eau de la ville d'Orgelet dans le Jura. Les turbines, au nombre de 2, mesuraient 6 mètres de diamètre et étaient installées à 42 mètres au-dessus d'un étang. Le mouvement du moteur était utilisé pour actionner des pompes aspirant de l'eau dans l'étang et la refoulant dans un réservoir situé sur une butte de 40 mètres d'élévation. Chaque turbine à vent refoulait à cette hauteur, en marche normale, environ 60 litres d'eau par minute, ce qui correspond à un travail d'environ 60 kilogrammètres seulement. Ce rendement n'est donc pas des plus brillants, aussi ce système n'a-t-il pas tardé à être remplacé par un plus perfectionné.

L'« Eclipse », de M. Vidal-Beaume. — Les qualités essentielles devant se trouver réunies dans un moteur à vent pour en faire un appareil réellement pratique sont les suivantes :

1° Roue motrice combinée de manière à fournir le plus grand

effet utile possible, par conséquent disposée pour recevoir le vent sur sa plus grande surface et construite avec la plus grande légèreté possible, sans altérer toutefois sa résistance sous la pression du vent;

2° Orientation automatique assurée par un mécanisme simple et sensible;

3° Dispositifs mécaniques permettant au moulin de résister aux tempêtes sans risques de détérioration, et ne comportant pas, autant que possible de ressorts de rappel ou de freins, ces organes constituant des agents sans sécurité;

4° Système de régularisation automatique pouvant assurer à la roue motrice une vitesse maxima déterminée et ne pouvant être en aucun cas dépassée.

Ces conditions se rencontrent associées d'une façon très ingénieuse dans le système l'*Eclipse* de M. Beaume, aujourd'hui universellement connu et apprécié, et qui a servi de modèles à bien d'autres systèmes nés après lui.

Nous lui consacrerons donc ici une courte description :

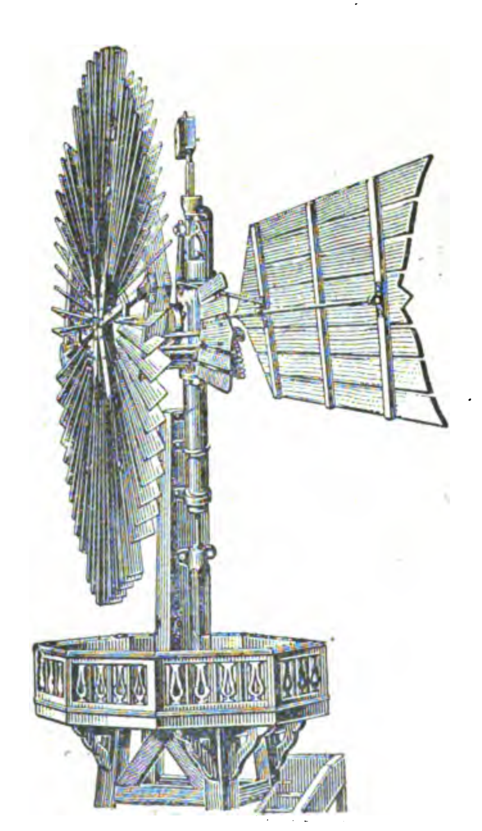


Fig. 1. — Aéromoteur de Vidal-Beaume dit moulin l'*Eclipse*.

La construction de ce moulin est très simple, ce qui facilite son montage, réduit son entretien au minimum et permet à n'importe quel ouvrier de le réparer. Il se compose des pièces suivantes : 1° la roue motrice ; 2° un bras supportant cette roue ; 3° un plateau d'excentrique communiquant le mouvement au moyen d'une bielle; 4° une girouette d'orien-

tation ; 5° une pièce supportant le mécanisme fixé sur un tube de fer creux traversant un manchon et pouvant tourner en tous sens ; 6° une ailette latérale régulatrice, et enfin deux secteurs dentés dont l'un est relié au levier de désorientation lequel reçoit à son extrémité un contrepoids servant d'antagoniste pour ramener la roue à sa position normale.

Cette roue, de forme circulaire est disposée verticalement et se trouve formée d'une armature en bois de frêne, dont les bras sont boulonnés au centre sur un moyeu en fonte calé à l'extrémité d'un arbre horizontal. Sur toute la surface de cette armature, sont fixées des lames de sapin, allant dans leur longueur, du centre aux extrémités où elles sont un peu plus larges et placées obliquement un peu comme les lames de persiennes, se recouvrant toutes, quoique en laissant du jour entre elles, de sorte que, de face, cette roue paraît pleine.

Quand le vent est faible, il frappe sur cette face. Dès qu'il grandit, sa seule intensité fait placer la roue transversalement. A mesure que la bise augmente de force, la roue devient de plus en plus oblique, et, si elle vient à souffler en tempête, elle s'incline jusqu'au point de ne plus présenter que sa tranche. Dans cette situation, la force atmosphérique ne rencontre plus qu'une surface presque nulle, et cette position est conservée tant que dure la bourrasque. Si le vent vient à faiblir, selon le degré de force qui lui reste, le contrepoids antagoniste ramène tout ou partie de la surface de la roue au vent. S'il arrive un coup de vent brusque, aussitôt la roue présente sa tranche pour revenir ensuite, aussitôt que la force sera moindre, ramenée qu'elle est par le contrepoids.

Quand la roue présente sa tranche, elle ne tourne plus tant qu'elle est maintenue dans cette position.

La girouette d'orientation, étant indépendante, a reçu pour fonction, de toujours *amener* au vent, laissant à l'aile latérale le soin de sa fonction, laquelle consiste à garer la roue motrice, ce qui, suivant le besoin *est fait instantanément et toujours automatiquement par la mise en jeu des secteurs dentés.*

N'a-t-on plus besoin de son travail, veut-on, pour une simple visite, le graissage ou une réparation, obtenir l'arrêt complet ? Une tringle composée d'un gros fil de fer permet d'obtenir de la terre toutes les positions indiquées ci-dessus jusqu'à l'arrêt en plaçant la roue dans le sens longitudinal de la girouette d'orientation.

Le moteur tourne avec des vents très faibles et par conséquent sans action sur la palette; mais, si la vitesse du vent augmente et devient considérable, la vanne régulatrice, qui reçoit aussi l'impulsion du vent, oblige la roue à s'obliquer et même à prendre une position parallèle à celle du gouvernail; à ce moment, la roue n'a plus rien à redouter du vent, puisqu'elle ne le reçoit plus que sur sa surface la plus restreinte. En opérant cette rotation, le bâti a entraîné son secteur articulé, lequel, trouvant un point d'appui sur le secteur denté fixe du gouvernail, entraîne à son tour le levier à contrepoids. La violence du vent diminuant, le contrepoids ramène, par une opération inverse, la roue à sa position primitive. L'orientation et la désorientation sont donc bien obtenues automatiquement, grâce à ce système.

L'appareil de transmission se compose d'un arbre horizontal en acier, noyé dans un palier graisseur; l'une de ses extrémités reçoit la roue motrice, et l'autre une manivelle actionnant une bielle dont la tête, guidée dans son mouvement vertical par une glissière, communique à l'aide d'une tringle en bois le mouvement alternatif produit jusqu'à la tige des pistons de la pompe commandée. Le moteur et son appareil de transmission sont supportés par un bâti en fonte fixé, à sa partie inférieure, sur un tube de fer creux formant axe et fixé au centre d'un manchon également en fonte. Des galets en acier intercalés entre le manchon et la base du bâti permettent à ce dernier de tourner librement autour de l'axe en fer creux.

Ainsi disposé, le moulin sert à l'élévation des eaux au moyen de pompes à mouvement rectiligne alternatif. Quand il s'agit de faire mouvoir des appareils exigeant un mouvement circulaire continu, tels que pompes à vilebrequin, outils de ferme, de mouture, dynamos, etc., une autre disposition est donnée au mécanisme de transmission. Dans cette circonstance, l'arbre horizontal sur lequel la roue motrice est montée, porte une roue dentée à la place de la manivelle. Cette roue communique le mouvement à un arbre vertical qui traverse le tube du bâti et vient à son tour commander par une paire d'engrenages d'angle à un arbre horizontal sur lequel sont calés les excentriques, poulies et autres organes de transmission des outils et machines à actionner.

La puissance motrice développée par les moulins est très

variable; elle est fonction directe de la vitesse et de la pression du vent sur la roue, mais elle se trouve limitée, d'une part par le diamètre (ou la surface totale) de la roue, et d'autre part par la vitesse de rotation extrême permise à cette roue et après laquelle elle s'efface et s'incline de façon à ne plus présenter que la tranche. Voici quelques chiffres indiqués par M. Beaume pour ses moulins *Eclipse :*

Diamètre de la roue	$2^m,55$	3 mètres	$3^m,60$	$4^m,20$	$4^m,80$	6 mètres.
Force développée	1/8 de chev.	1/4 chev.	1/2 chev.	3/4 chev.	1,1/2 ch.	3 chev.

On peut donc conclure que, pour obtenir du vent une puissance motrice un peu considérable, il faut des roues d'un grand diamètre et en même temps fort légères et obéissant presque instantanément à la commande du régulateur pour maintenir la constance de la rotation.

Aéromoteur Durey-Sohy. — Ce système repose sur le même principe de régulation que celui que nous venons de décrire, et il n'en diffère que par certains détails. La roue motrice est en bois, avec moyeu de fonte, et un plateau manivelle avec une bielle transmettant aux pompes le mouvement alternatif.

L'arbre tourne dans un palier graisseur supporté par un étrier reposant sur une série de billes d'acier qui procurent un frottement de roulement ne nécessitant pas un graissage abondant et donnant à l'appareil une extrême mobilité, ce qui permet une orientation rapide exigée par les changements souvent brusques et intempestifs de direction des courants aériens, et indispensable pour empêcher le moulin d'être surpris dans une position défavorable par la tempête.

Tant que la force du vent ne dépasse pas une certaine limite, le gouvernail oriente la roue, de manière à lui faire présenter sa plus grande surface à l'action de l'air en mouvement et lui faire rendre le maximum de puissance. Mais si la force des courants atmosphériques atteint une valeur dangereuse pour le moteur lui-même ou pour les appareils qu'il actionne, une palette ou vanne régulatrice placée sur le côté de la roue et reliée par une longue tige à son palier tournant, entre en jeu et provoque la désorientation de

la roue et du gouvernail. Là encore nous trouvons les secteurs dentés et le contrepoids antagoniste dont nous avons expliqué le but et le fonctionnement dans la description du système précédent. Grâce à cette disposition heureuse de désorientation automatique, le moulin n'a rien à redouter des sautes de vent subites et des rafales si dangereuses pour les moulins ordinaires.

Moteurs américains. — L'Amérique nous a devancés dans l'emploi des turbines atmosphériques appelées là-bas *aermoteurs.*

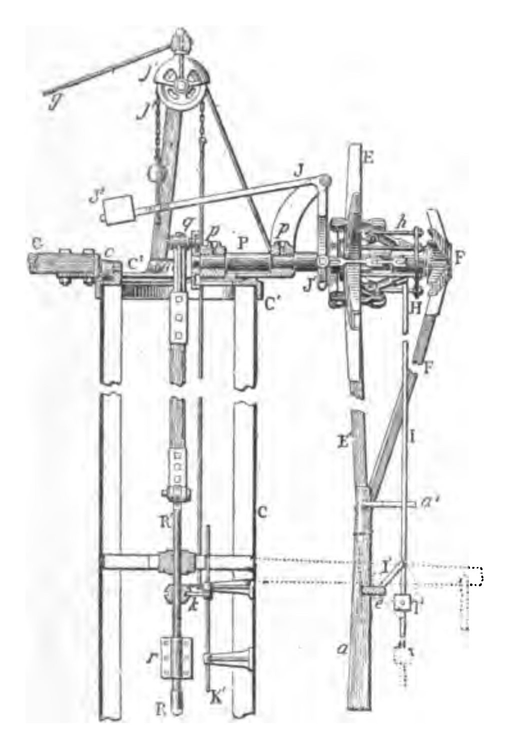


Fig. 2. — Mécanismo du moulin automoteur Halladay.

Une Compagnie de Chicago a fabriqué à elle seule depuis vingt ans plus d'un million de ces utiles appareils qui se sont répandus dans toutes les campagnes grâce à leur prix extrêmement réduit. Beaucoup de ces moulins, au lieu d'employer le bois dans leur construction sont construits entièrement en acier et en fer galvanisé. Dans le système Halladay, exploité en France par M. Scha-

bayer, le dispositif de régulation est complètement différent des précédents. Six tiges en équerre fixées sur les bras de la roue (fig. 2, 3 et 4) participent à son mouvement et suivant la force centrifuge développée, règlent l'obliquité des lames constituant la roue, sur l'arbre qui les porte Le contrepoids ne sert qu'à déterminer l'instant où le mécanisme doit agir, la vitesse de rotation de la roue dépassant la moyenne qu'elle doit conserver. Le système Halladay a reçu pour sa part plus de trente mille applications dans le monde entier, ce qui est une preuve de son incontestable utilité.

Il y a un puissant intérêt, en effet, à capter au profit de l'humanité les grandes forces libres de la nature, dont les sources sont inépuisables car elles se régénèrent perpétuellement. Métamorphoser le vent en lumière ou en force mécanique, le débiter d'une façon constante en portions inégales, enfin soumettre cette énergie si capricieuse à la volonté de l'homme, ce problème

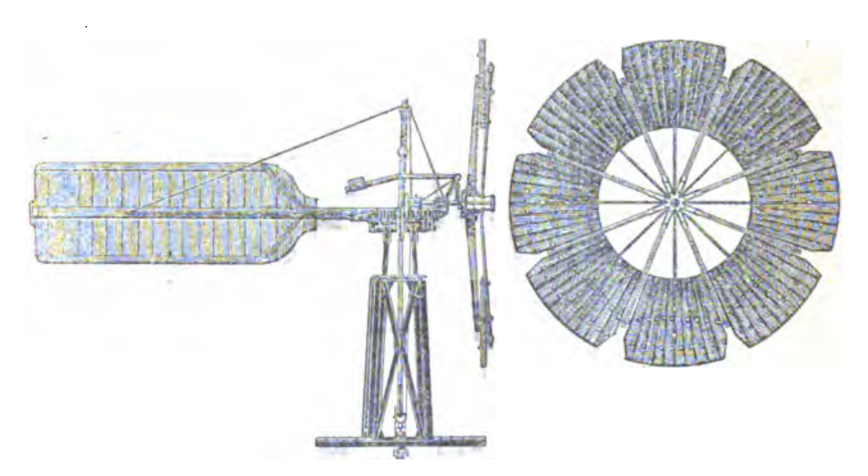


Fig. 3 et 4. — Turbine aérienne Halladay, vue de profil et roue motrice vue de face.

grandiose, le moulin automoteur a permis de le résoudre, et c'est pourquoi on ne saurait trop en vulgariser l'emploi.

Moulin à vent « Star ». — Ce modèle, de construction américaine, présente certains avantages, sa solidité est considérable et lui permet de résister aux efforts les plus violents et les

plus subits. Il se compose d'une série d'ailes creuses disposées comme les rayons d'une roue et constituant une turbine aérienne. Sauf quelques pièces d'assemblage en fonte, tout le mécanisme du moulin est en acier galvanisé, et la rouille est rendue impossible grâce aux précautions prises. La roue est montée au sommet d'un pylône à base triangulaire, également en acier, et dont la solidité est à toute épreuve. La transmission du mouvement s'opère par un mécanisme alternatif ou rotatif, suivant l'application qu'il s'agit de réaliser.

La conformation générale des moulins à tige verticale rotative est la même que celle des moulins avec tige à mouvement plongeant alternatif. La différence réside en ce que le mouvement de la roue, au lieu d'être transmis à un plateau manivelle, se com-

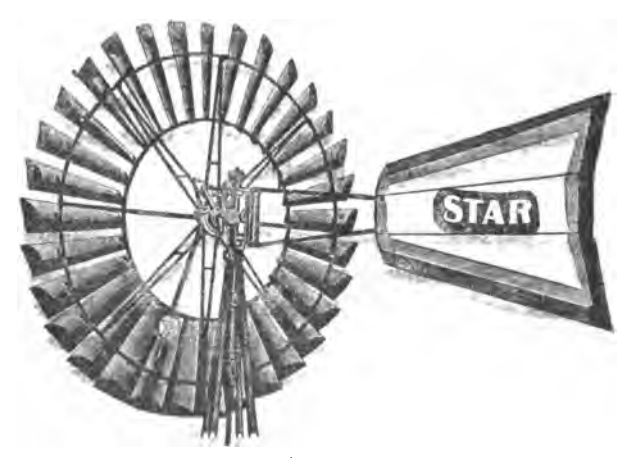


Fig. 5. — Aéromoteur ou turbine atmosphérique, modèle *Star*.

munique par une série d'engrenages accélérateurs, à un arbre vertical qui descend dans l'axe du pylône.

Au moyen d'engrenages d'angle placés à une hauteur convenable au-dessus du sol, l'arbre vertical entraîne un arbre de transmission horizontal sur lequel sont montées les poulies de commande des machines que l'on désire actionner. Dans certains cas particuliers, les machines peuvent être actionnées directement par l'arbre vertical, ce qui simplifie l'installation.

Les applications de ces moulins à vent sont nombreuses. C'est le moteur par excellence pour la ferme. Sa surveillance et son

entretien sont insignifiants et il fournit la force à peu près gratuitement.

Le moulin à vent *Star*, à mouvement rotatif, est employé pour moudre le grain, hacher la paille, actionner les coupe-racines et les barattes, pour scier le bois, élever l'eau, etc. Il permet enfin la production de l'énergie électrique au moyen de batteries d'accumulateurs, attendu qu'il est possible de calculer et de déterminer, en tout temps, la force mécanique développée par l'appareil avec les vitesses de vent les plus variables. Pour donner un aperçu du prix de l'appareillage, point qui intéresse particulièrement les personnes susceptibles d'adopter ce moteur économique, nous dirons que le moulin à roues de $2^m,40$ vaut 325 fr. (à mouvement alternatif) et le pylône de support de 9 mètres de hauteur 350 francs. Les moulins à mouvement rotatif à roue de $4^m,85$ de diamètre coûtent 1.450 francs et leur pylône de 18 mètres 1.600 francs. La force développée est de 3 chevaux environ et l'entretien se borne aux frais de graissage. C'est donc une machine économique au premier chef, et c'est pourquoi nous avons tenu à la décrire ici avec quelques détails.

Turbine aérienne Bollée. — Ce modèle de turbine à vent se compose (fig. 6) de deux roues en tôle d'acier A et B. L'une de ces deux roues est immobile et sert simplement à diriger, comme dans les turbines hydrauliques, les filets d'air sur la roue mobile. Ces deux roues portent des aubes courbes dirigées en sens contraire.

La roue mobile est clavetée sur un arbre horizontal A qui commande au moyen des engrenages C l'arbre vertical V. Tout l'ensemble est supporté par une solide colonne en fonte P dont la base est munie d'une couronne dentée G dont nous allons voir l'utilité pour l'orientation.

Tout le mécanisme repose sur une longue colonne creuse en fonte, faisant office de pylône. Cette colonne est maintenue rigide au moyen de haubans prenant sous la couronne dentée et fortement ancrés dans le sol.

Le système d'orientation de la turbine Bollée est sensiblement le même que celui du *Moulin hollandais* bien connu. Nous retrouvons donc le moulin ou *papillon* M. Ce moulinet doit pouvoir entraîner tout l'ensemble du mécanisme pour amener la tur-

bine face au vent. Supposons que l'on veuille mettre l'appareil en marche, le moulinet M sera déclanché, il décrira un arc de 90^0 en pivotant autour de son axe mobile H et entraînant le bâti B. Le contrepoids X fixé à une chaînette passant dans la gorge de la poulie R descendra de quelques centimètres. Le vent frappant alors les ailes du moulinet, celui-ci se mettra à tourner en action-

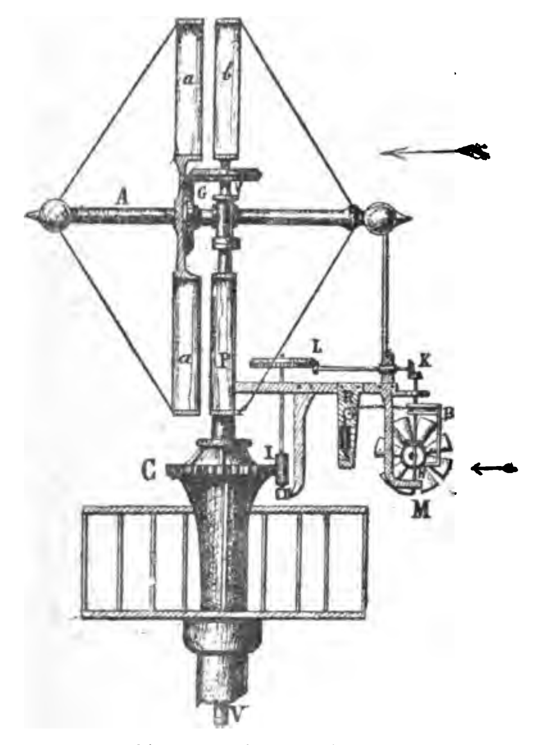


Fig. 6. — Aéromoteur Bollée.

nant les séries d'engrenages coniques K, L, qui feront tourner le pignon I. Ce pignon engrenant avec la couronne dentée C qui lui sert de point d'appui, tournera tout autour de cette couronne jusqu'à ce que le moulinet M soit parallèle à la direction du vent, position qui correspond à celle où la turbine est en bonne position pour le travail, c'est-à-dire face au vent. Si le courant d'air change de direction, il est facile de comprendre que le moulinet tournant, soit à droite, soit à gauche, ramènera toujours la roue dans une bonne position prospère au travail.

Comme dans les autres moteurs à vent, il faut que, si le vent dépasse une certaine vitesse, la roue se désoriente. Voici comment ce résultat est obtenu dans la turbine Bollée (fig. 7).

Le moulinet M est maintenu dans sa position de travail par le contrepoids X dont la chainette passe dans la gorge du secteur S et de la poulie R. Ce contrepoids faisant traction sur la chainette a été calculé pour maintenir le moulinet au vent pour des *vitesses inférieures* à 12 mètres à la seconde. Si donc le vent atteint cette vitesse, le moulinet soulève le poids X en se désorientant dans le sens de la flèche F et prend différentes positions *u* jusqu'à *y*. L'air frappe toujours les ailes du moulinet ; mais la courbure des ailes ayant changé de sens, l'ensemble de la turbine tourne en

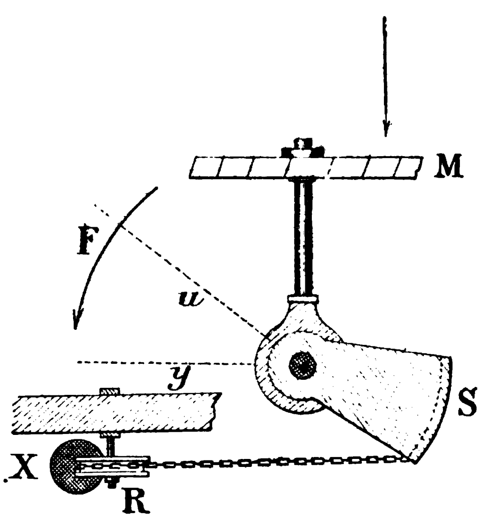


Fig. 7.

sens inverse jusqu'à ce que celle-ci soit désorientée. En augmentant ou diminuant le contrepoids X, on peut donc déterminer l'effacement de la roue à différentes vitesses du vent. Le mécanisme de la turbine Bollée est certainement très ingénieux ; mais il est à craindre qu'en cas de tempête la désorientation n'en soit pas assez rapide. Du reste, le prix de cet appareil, 3,200 francs le plus petit modèle (8 à 10 fois plus cher qu'un Aermotor de même force) fera qu'il restera toujours le moteur à vent des gens très fortunés.

Aèrmoteur *Hercule.* — Nous pourrions encore décrire les moulins à vent automoteurs construits en France par Anceaux, Plissonnier, Rossin, Allaire, Grégoire, etc., mais il faut nous borner, les explications précédentes suffisant à rendre compte des procédés employés avec quelques variantes pour assurer un réglage et une orientation automatiques, et permettre aux appareils de résister aux tempêtes sans être démolis ou emportés. Nous ne ferons qu'une exception pour l'*Aermoteur* de M. Bruneau, d'Oran (fig. 8).

Les ailes, dans cet appareil, sont composées de voiles triangu-



Fig. 8. — Turbo-moteur atmosphérique (aermoteur *Hercule*).

laires fixées, suivant un de leurs côtés, sur les bras d'une étoile à six branches. La pointe libre de chaque voile est attachée à un cordeau passant dans la gorge d'une poulie puis à l'intérieur de l'axe de rotation qui est creux, pour venir s'attacher à un contrepoids composé d'une série de rondelles, en plus ou moins grand nombre suivant la résistance que l'on veut donner au moulin. Le

rôle de ce contrepoids régulateur est facile à saisir : l'appareil étant en marche, s'il survient une rafale les voiles cèdent sous la pression exercée sur elle par le vent, tirent sur les cordes et obligent le contrepoids à remonter. La surface utile diminue et l'aermoteur continue à tourner avec la même vitesse. La bourrasque une fois passée, le poids, en redescendant, agit en sens inverse sur les cordes et ramène les extrémités des voiles à leur position primitive sans que la force disponible ait sensiblement varié durant ces manœuvres.

La disposition des voiles permet à l'appareil de s'orienter de lui-même sans gouvernail ; un excentrique placé sur l'arbre ou un train d'engrenages à pignons assurent la transmission, enfin une traction opérée depuis le sol, à l'aide d'un contrepoids spécial, suffit pour obtenir l'arrêt.

Tels sont les principaux systèmes de moteurs à vent usités en France et dont les applications ont été se multipliant dans ces dernières années. Mais il ne faut pas oublier que ces machines sont, avant tout, des moteurs agricoles dont l'emploi n'est vraiment pratique et avantageux que dans les plaines ou sur les coteaux où le vent souffle presque constamment d'un bout de l'année à l'autre.

Applications des turbines atmosphériques. — Ainsi que nous l'avons montré au début de ce chapitre, le principal usage qui ait été fait pendant des siècles des moteurs à vent, a été la commande des meules destinées à broyer le blé. Mais depuis que l'on est parvenu à rendre ces moteurs moins irréguliers et d'un fonctionnement automatique, on leur a imposé de nouvelles applications, entre autres l'élévation des eaux pour irrigations et même la commande des diverses machines et outils d'agriculture ou d'industrie. On est même parvenu à commander des dynamos pour la production de la lumière électrique, et c'est sur ce genre d'applications que nous nous étendrons plus longuement ici.

Les premières tentatives effectuées vers 1885 près des phares de la Hève par M. de l'Angle-Beaumanoir pour transformer la force capricieuse du vent en énergie électrique, ne furent pas couronnées de succès et les essais ne tardèrent pas à être aban-

donnés par leur promoteur. Ensuite, M. Brush, l'électricien bien connu, présida à l'agencement d'une turbine aérienne de grandes dimensions, supportée par une tour mobile. Cette turbine actionnait directement une dynamo travaillant sur une batterie d'accumulateurs ; la quantité d'énergie emmagasinée pendant le jour était suffisante pour assurer le soir l'alimentation d'un réseau de 250 lampes de 16 bougies. Ces premiers résultats étaient donc assez encourageants.

La grande difficulté de l'utilisation de la force gratuite des courants aériens réside dans le fait que le vent agit par bouffées successives et fournit des impulsions très variables, tandis qu'une dynamo exige, pour donner un rendement satisfaisant, une vitesse de rotation aussi constante que possible. Un excès de vitesse brûle les fils et met hors d'usage les dynamos, et pas assez de vitesse laisse retourner à la dynamo l'électricité emmagasinée dans les accumulateurs.

On est arrivé, paraît-il, à imaginer un appareil qui, automatiquement, coupe le circuit des accumulateurs si le vent devient trop fort ou trop faible et ne le laisse fermé que pour une vitesse régulière et déterminée. Cet appareil, appelé conjoncteur-disjoncteur, met la dynamo hors circuit pendant les irrégularités de la marche et, comme une soupape dans une pompe, permet au courant électrique de passer dans les accumulateurs sans le laisser revenir des accumulateurs à la dynamo.

La vitesse du vent la plus convenable à un bon fonctionnement est celle de 7 mètres à la seconde ; elle correspond à une pression de 6 kilogrammes par mètre carré de surface de voilure. D'après ces données, on a calculé que le diamètre d'une roue de moulin à vent de la puissance de 1 cheval doit avoir 3 mètres à $3^m,30$, et de 5 mètres pour 2 chevaux, avec une vitesse de 20 tours par minute.

Dans une des plus récentes installations, le moteur à vent est actionné par l'intermédiaire d'une transmission à engrenages avec dynamo qui charge une batterie d'accumulateurs capable d'alimenter les lampes pendant 15 ou 20 heures, c'est-à-dire pendant l'absence totale du vent.

La dynamo a ses inducteurs à double enroulement ; un fil fin en dérivation, un gros fil en série de telle sorte que le voltage est constant pour des vitesses variables. Une dynamo de 30 ampères

sous 50 volts entretient ainsi constamment chargée une batterie d'accumulateurs de 25 éléments qui peut alimenter 30 lampes à incandescence de 16 bougies. Le vent, soufflant plus régulièrement en hiver probablement parce que le besoin d'éclairage est plus grand, tout le monde se trouve satisfait.

Le prix de l'éclairage ainsi obtenu ne comporte que l'amortissement des dépenses initiales; aussi la lampe de 16 bougies ne revient-elle qu'à 0 fr. 01 par heure, c'est-à-dire moitié moins que le pétrole.

De longues et consciencieuses études des conditions anémométriques de l'Allemagne septentrionale, notamment des côtes des mers du Nord et Baltique, ont conduit M. Gustave Conz, de Hambourg, à se poser la question de l'utilisation industrielle des vents en abondance dans ces parages, en vue de la production d'énergie électrique. Il a imaginé un système d'intercalations électriques pour obvier aux inconvénients de la marche si variable des installations de cette sorte.

Pour mettre ses projets en pratique, M. Conz s'adressa à la fabrique de turbines à vent (F Neumann, à Wittkiel, Schleswig-Holstein), qui mit une grande turbine à vent à sa disposition. Cette roue anémométrique possède un régulateur pour assurer un nombre de tours constant et rendant possible la marche du moteur exactement à l'allure d'un tour complet par minute, dès que l'impulsion minimum pour le mettre en mouvement a été dépassée. La roue, qui, par vent de tempête, peut fournir 30 chevaux-vapeur, actionne, à l'aide d'une transmission mécanique ordinaire, une dynamo à marche lente de la maison G. Conz, qui sert tout d'abord à charger une grande batterie d'accumulateurs Hagen et qui est principalement destinée à emmagasiner l'énergie nécessaire à l'éclairage de l'usine et de la commune de Wittkiel, mais qui doit aussi en temps de calme, seule et éventuellement de concert avec le moteur à vent, mettre en marche les machines de l'établissement.

On suivit avec attention les premières expériences de cette nouvelle et originale production de l'électricité. Ces expériences eurent lieu en présence des collaborateurs intéressés en 1901 et le résultat dépassa l'attente générale.

Le premier jour on eut l'occasion d'éprouver tous les degrés du vent, depuis le calme le plus absolu qui régna au lever du

soleil jusqu'à l'impétueux vent sud-ouest qui survint dix heures après. A une vitesse de vent de 2 mètres à la seconde, le vent fit tourner la roue sans charge avec sa vitesse intégrale qui était de 11 tours à la minute : à une vitesse de 2^{m},50 la tension de la dynamo permit l'intercalation de la batterie. En cet état il y eut équilibre complet entre la force du vent et les accumulateurs. Tantôt la batterie reçut du courant, tantôt elle en céda, et maintint ainsi les tours de la roue à leur vitesse intégrale, même par les moments de calme. En d'autres termes, la dynamo était tour à tour active et passive. La disjonction automatique de la batterie était tout à fait inutile, parce que la batterie n'avait, en ce cas, que peu d'ampères à fournir pour suppléer à l'impulsion insuffisante du vent. A une vitesse de 3 mètres à la seconde, on pouvait déjà charger avec continuité, et, à partir de là, avec toute la force de courant désirée. La tension à la batterie resta tellement égale qu'on eût cru travailler avec une machine à vapeur de précision, et la lumière électrique de l'usine éclairait avec une uniformité parfaite.

L'on essaya aussi de l'éclairage direct avec 110 volts, mais en faisant fonctionner la batterie en parallèle, en sorte qu'elle servit de compensatrice. L'effet fut brillant, la lumière était d'une fixité absolue, et le voltmètre n'accusait de variations que de moins d'un volt. Cette égalité était due surtout au grand poids de la roue de la turbine à vent, qui, avec la régularisation précise et automatique obtenue, tint le nombre de tours de la dynamo très constant.

Ces expériences, admirablement réussies, permettent d'exprimer l'espoir que l'on arrivera à pourvoir les petites localités de l'éclairage électrique d'abord et ensuite de la force motrice nécessaire pour labourer, herser, battre le blé au moyen de transmissions, faire marcher des pompes à incendie et des élévateurs d'engrangement, le tout par la force du vent.

Les frais d'établissement d'une pareille installation sont absolument minimes en comparaison des avantages qu'elle procure. Il va sans dire que la batterie doit être choisie en conformité du travail à effectuer.

CHAPITRE III

Les Turbo-moteurs hydrauliques

Partout où l'on dispose de chutes d'eau, de rivières ou ruisseaux d'un volume et d'un courant suffisants, les moteurs hydrauliques constituent incontestablement les machines les plus commodes et les plus économiques. Ces appareils, connus depuis de longs siècles, ont reçu, dans ces dernières années, de très sérieux perfectionnements, dûs en grande partie au développement pris par l'industrie électrique. Nous retrouvons donc ici une preuve nouvelle de ce que nous avancions dans notre premier chapitre : à savoir que la science humaine forme un bloc compact dont on ne peut faire progresser une partie sans influencer aussitôt tout l'ensemble. Chaque découverte, d'un ordre quelconque, a aussitôt sa répercussion dans toutes les branches de l'activité humaine. L'extension formidable prise tout d'un coup par les applications de l'électricité a eu tout particulièrement un contre-coup énorme dans une foule d'industries de toute nature, et l'on trouve trace presque partout de cette influence.

L'énergie mécanique peut se transformer maintenant, directement et avec la plus grande facilité, en énergie électrique qui peut être transportée au loin pour reproduire du mouvement, engendrer de la chaleur et de la lumière, ou utilisée sur place à des préparations électrochimiques. On conçoit donc quel champ illimité d'action l'énergie mécanique peut fournir aux hommes, et l'on s'explique aussitôt pourquoi ils se sont constamment efforcés de domestiquer, de canaliser et d'asservir ces sources naturelles et économiques d'énergie constituées par les nombreux cours d'eau qui, de toute part, sillonnent notre planète.

Les moteurs à eau ont de précieux avantages : ils sont d'abord

d'une grande simplicité qui rend faciles leur conduite et leur entretien, les causes de dérangement du mécanisme étant assez rares. Ils ne demandent qu'un personnel restreint et sans grandes connaissances techniques, enfin ils ne consomment aucun combustible ou produit coûteux. Le seul inconvénient réside dans la variabilité de la force utile qu'ils développent, chaque fois que la totalité du volume d'eau disponible est employée. En effet, le débit des cours d'eau est souvent irrégulier et varie suivant les saisons.

A certaines époques de l'année ce débit est exagéré par les crues et les montées de l'eau, tandis qu'à d'autres moments la sécheresse est telle qu'il n'est pas rare de voir réduite à quelques chevaux-vapeur la puissance de machines motrices capables de développer plusieurs centaines de chevaux en temps ordinaire, avec des eaux de hauteur moyenne. Il faut alors adjoindre à la machine hydraulique un moteur de secours, ce qui complique l'installation et augmente dans de notables proportions le prix de premier établissement. Cet inconvénient n'existe pas quand on n'utilise qu'une partie de la chute d'eau pour alimenter la dérivation nécessaire au moteur. L'usine hydraulique des cataractes du Niagara, par exemple, ne souffrira jamais du manque d'eau, car elle correspond à au moins deux millions et demi de chevaux-vapeur, et elle n'en utilise actuellement que 250,000 chevaux, soit à peine un dixième.

On déduit donc immédiatement de ce qui précède, que la première qualité d'un moteur hydraulique doit être de se trouver influencé le moins possible par le changement de ses conditions de fonctionnement; non seulement son rendement doit être bon à pleine charge, quand l'eau est en abondance, mais ce bon rendement doit se maintenir lorsque la quantité d'eau disponible diminue et qu'il devient d'autant plus nécessaire d'en tirer le meilleur marché possible. Or, il arrive fréquemment que des moteurs hydrauliques donnent un bon rendement, atteignant et dépassant 80 0/0 lorsqu'ils travaillent avec leurs vannes grandes ouvertes, mais voient leur rendement décroître dans des proportions énormes aussitôt que le manque d'eau change leurs conditions de marche. Par exemple, une turbine développant 100 chevaux à pleine admission, avec un rendement de 80 0/0, ne donne plus que 25 chevaux lorsque la quantité d'eau n'a diminué que de

moitié, le rendement étant tombé de 80 à 40 0/0. On juge donc du haut intérêt que présente la conservation du rendement *à admission partielle*, puisque c'est justement au moment où l'on manque d'eau qu'il faut songer à utiliser jusqu'à la dernière limite la force disponible et se rapprocher le plus possible de la puissance théorique. Aussi les constructeurs se sont-ils ingéniés, surtout depuis vingt ans, à doter leurs appareils de cette précieuse qualité et plusieurs y sont parvenus grâce à des dispositions spéciales.

Nous nous bornerons à donner dans le présent chapitre quelques considérations relatives aux moteurs hydrauliques en général et aux turbines en particulier, en nous aidant, pour cet examen comparatif, de l'étude si intéressante publiée sur ce sujet par M. Prasil, professeur à l'Ecole polytechnique de Zurich et M. Rateau, ingénieur au corps des mines, dans l'ouvrage : *La Mécanique à l'Exposition de 1900.*

Il n'est pas besoin de rappeler que, depuis leur invention, vers 1825, par Fourneyron, les moteurs utilisant le poids de l'eau ont reçu des applications de plus en plus nombreuses, vu leur facilité à se plier à toutes les circonstances. Toutefois, c'est depuis une quinzaine d'années seulement que l'on remarque une extension formidable prise par ce genre de machines, parallèlement au developpement de l'industrie électrique. La turbine électrique s'associe aisément à la dynamo et permet de transformer en énergie électrique la force vive des torrents et des chutes d'eau si nombreuses dans les pays de montagne, mais cette association a nécessité la création de dispositifs nouveaux, particulièrement pour produire des forces considérables et obtenir un réglage aussi parfait que possible de la vitesse de rotation, malgré des variations brusques et importantes dans le travail extérieur.

Le dernière Exposition universelle présentait donc à cet égard un sujet d'études du plus haut intérêt, car les turbines hydrauliques y constituaient, en 1900, un ensemble important parmi la classe générale des moteurs. La plupart des constructeurs spécialistes, français et suisses, avaient exposé leurs modèles les plus remarquables et on pouvait constater les soins apportés à l'importante question du réglage automatique de la vitesse de rotation dans les divers types. Voici quelle est d'ailleurs l'appréciation portée par MM. Prasil et Rateau sur ces turbo-moteurs hydrauliques :

Turbines centripètes. — Il y a déjà fort longtemps que le dispositif dit *centripète* est connu et est appliqué aux turbines. C'est l'américain Francis qui en reconnut, vers 1845, les avantages et construisit en 1840 un modèle donnant un rendement satisfaisant. Après lui, les ingénieurs américains développèrent le genre centripète sous des formes très variées, mais ce système ne pénétra en Europe que longtemps plus tard. Les établissements Singrün frères, d'Épinal, se firent, tous les premiers, en France, une spécialité de la construction de ce genre de turbines dites *Hercule* et que nous étudierons dans le chapitre suivant. Quelques constructeurs allemands essayèrent ensuite d'entrer dans cette voie vers la même époque, et les Suisses ont fini par suivre le mouvement, si bien qu'aujourd'hui, quand il s'agit de turbines à injection totale, qu'on installe sur des chutes faibles ou moyennes, c'est presque toujours au type centripète que l'on s'adresse.

Nous dirons un peu plus loin quels sont les avantages propres à ce système et qui lui ont ainsi permis de s'imposer.

Les turbines centripètes sont toujours, bien entendu, des turbines à réaction, c'est-à-dire qu'à la sortie du distributeur dans les joints entre la roue à aubes et le distributeur fixe, la pression n'est pas encore tombée à ce qu'elle sera à la sortie de la roue. Ordinairement le degré de réaction est voisin de 0,5. Les avantages qui résultent de cette disposition sont les suivantes :

Meilleur rendement mécanique. — A égalité de coefficients de pertes à l'entrée de la roue et dans les aubes de celle-ci, le rendement des centripètes est un peu plus élevé que celui des centrifuges et même que celui des hélicoïdes ; environ 2 0/0, mais il faut considérer d'autre part que les coefficients de pertes doivent être eux-mêmes plus faibles dans ce genre de machines, puisque les aubes de la roue mobile y sont relativement moins longues et moins courbes que dans les autres genres. Le gain sur le rendement devient maximum vers la *vitesse relative* de 0,80 [1]. Dans des conditions analogues, le gain peut atteindre alors de 4 à 5 0/0.

1. La vitesse relative d'une turbine est le rapport entre sa vitesse linéaire u_0 au point d'entrée de l'eau dans la roue, à la vitesse $\sqrt{2\,g\,H}$ due à la hauteur de chute. Si nous désignons par ξ cette vitesse relative nous avons donc : $\xi = \frac{u_0}{\sqrt{2\,g\,H}}$.

Application des amortisseurs. — La turbine centripète se prête facilement, au moins lorsque l'axe est vertical, à l'application des amortisseurs, lesquels se réduisent dans ce cas à de simples tuyaux coniques divergents. Grâce à ces organes, le bénéfice sur le rendement peut s'accroître de quelques unités p. 100.

Plus grande vitesse relative. — A égalité de rendement ou même à rendement supérieur, la vitesse relative des centripètes peut être portée à un chiffre notablement plus élevé qu'avec les autres genres de turbines. Il résulte de ce fait qu'à égalité de diamètre de la roue mobile, la vitesse angulaire est plus grande, ce qui est généralement avantageux pour l'accouplement avec des génératrices électriques.

Diamètres plus petits, ailes moins nombreuses. — Pour la même puissance, le diamètre de la roue est plus petit dans le modèle centripète. Les aubes peuvent aussi être moins nombreuses, parce qu'il est possible de les prolonger jusque près de l'axe. Il résulte de ces deux avantages que sur une même hauteur de chute et avec un même nombre de tours par minute, la puissance développée est supérieure dans les centripètes.

Plus grande facilité de vannage. — Le distributeur étant, dans ce système, extérieur à la roue mobile, présente naturellement ses plus grandes sections à l'entrée. On a donc toute facilité pour trouver le logement des vannes, en rétrécissant au besoin les canaux distributeurs à l'endroit où une vanne doit trouver à s'effacer. Aussi voit-on, dans les centripètes, une bien plus grande variété de vannages que dans les centrifuges. Ces dernières ne permettent guère qu'une seule sorte de vanne : la vanne cylindrique à translation placée, soit à l'entrée, soit à la sortie de la roue mobile. On remarquera également que les organes de distribution et de vannage étant extérieurs à la roue mobile, on trouve toujours à les loger, même avec de très faibles diamètres de roues et qui seraient inadmissibles avec des distributeurs intérieurs.

Vitesse d'emballement plus faible. — Avec la disposition centripète, la courbe de rendement, en fonction de la vitesse relative, tombe plus vite quand la vitesse de rotation augmente au delà du chiffre normal. Autrement dit, la vitesse limite à charge nulle, qu'on désigne aussi sous le nom de *vitesse d'emballement* est, dans les centripètes, plus petite que le double de la vitesse

normale (en rendement maximum), tandis qu'elle est sensiblement égale à cette valeur double dans le cas des hélicoïdes, et plus grande dans les centrifuges. Il y a donc là une propriété qui peut constituer, dans certaines circonstances, un avantage réel.

Installation moins coûteuse.— Enfin l'installation des centripètes est plus simple et moins coûteuse que pour les autres genres, quand la turbine est placée dans une chambre d'eau en maçonnerie. Mais c'est l'inverse qui a lieu si la machine doit être enfermée dans une chambre métallique. La turbine centripète devient alors plus encombrante peut-être et, en tout cas, plus coûteuse que les autres. C'est là, à notre avis, le seul véritable défaut des turbines centripètes.

Turbines de grande puissance. — Disons maintenant quelques mots de l'importante question des turbines de grande puissance sur faibles chutes. Autrefois on ne s'en préoccupait guère, tandis qu'aujourd'hui, pour l'accouplement direct avec les machines dynamo-électriques, on a besoin de faire des turbines aussi puissantes que possible pour un nombre de tours déterminé, la hauteur de la chute étant fixée, ou encore, ce qui revient au même, d'obtenir la vitesse de rotation la plus élevée pour une puissance déterminée. Il convient donc d'examiner jusqu'où l'on peut aller avec une seule roue mobile et ensuite comment on peut associer entre elles plusieurs de ces roues, de manière à grouper leurs puissances sur le même arbre.

Quand la hauteur de chute dépasse 40 mètres comme dans le cas des installations bien connues du Niagara, il est facile de construire une turbine qui développe l'énorme puissance de 5.000 chevaux-vapeur, par exemple, sur un arbre tournant relativement vite (250 tours par minute dans le cas du Niagara). L'accouplement avec la génératrice électrique se fait dès lors dans les meilleures conditions pour l'une et pour l'autre machine. Mais il n'en va pas de même si la hauteur de chute est faible. Déjà à 10 ou 12 mètres, on a bien de la peine à établir des turbines qui tournent aussi vite que le demandent les constructeurs de dynamos, tout en conservant un bon rendement mécanique, et l'union des deux machines nécessite de leur part des concessions mutuelles ; à 5 ou 6 mètres, il y a franchement incompatibilité entre elles; pour les accoupler, il faut alors sacrifier l'une ou l'autre.

L'efficacité d'une turbine au point de vue où nous nous plaçons ici est parfaitement définie par un coefficient, que nous appelons coefficient de puissance et dont l'expression est la suivante :

$$\tau = \frac{\omega^2 P}{(2g)^{3/2} \Pi H^{2.5}}$$

dans laquelle :

ω désigne la vitesse angulaire de l'arbre,
P, la puissance, en kilogrammètres par seconde,
g, la constante de la gravité terrestre en mètres par seconde,
Π, le poids spécifique du liquide qui traverse la turbine : 1.000 kg par m^3, en pratique, pour l'eau,
H, la hauteur de chute en mètres.

Il est facile de se rendre compte que toutes les quantités qui entrent dans cette formule étant exprimées en unités concordantes l'expression numérique de τ est un simple nombre indépendant des unités de mesure, et ce nombre caractérise d'une manière parfaite un type de turbine au point de vue de la puissance qu'il sera susceptible de fournir sur une chute donnée, avec un nombre de tours par minute assigné à l'avance.

Nous voyons notamment, d'après l'expression ci-dessus, que la hauteur de chute étant déterminée, la puissance que pourra donner un type de turbine sera inversement proportionnelle au carré de la vitesse angulaire et que, d'autre part, la vitesse angulaire étant déterminée, la puissance croîtra plus vite que le carré de la hauteur de chute ; exactement elle sera proportionnelle à $H^{2.5}$.

On peut introduire, dans l'expression de ce coefficient, la vitesse relative de la turbine. On constate alors que cette vitesse relative y entre au carré. Il y a donc un très grand intérêt, pour faire des turbines puissantes, à élever le plus possible leur vitesse relative. En construisant les courbes de rendement mécanique des différents types de turbines en fonction de cette vitesse relative, on se rend compte qu'il y a avantage à adopter des turbines à forte réaction : 50, 60 et même 70 0/0. D'autre part, l'on pourra donner à la vitesse relative une valeur un peu plus élevée que celle qui correspond au maximum de rendement, et l'on sera ainsi

conduit à choisir une valeur de cette vitesse relative supérieure d'environ 15 0/0 à celle du maximum de rendement.

Ainsi se trouvent justifiées les pratiques des constructeurs actuels qui fixent habituellement entre 0,80 et 0,85 les vitesses relatives des turbines de grande puissance. Avec ces valeurs, l'on n'a pas encore, à beaucoup près, les limites possibles des puissances ; mais si l'on augmentait davantage le coefficient de vitesse, on devrait subir inévitablement une diminution corrélative du rendement mécanique.

Précisons par quelques chiffres ce que l'on peut arriver à faire avec les genres hélicoïde, centrifuge et centripète :

1° *Genre hélicoïde.* — Dans les turbines Jonval modernes, à deux ou trois couronnes d'aubes, on va jusqu'à une vitesse relative périphérique ξ égale à 1,05, avec un rapport des diamètres interne et externe atteignant 2,45 et un angle α au distributeur égal, en moyenne à 24°. Le coefficient τ de puissance atteint, dans ces conditions, la valeur 0,44, alors que le rendement mécanique net reste supérieur à 0,76, si la construction de la turbine est soignée.

Mais avec $\xi = 1,05$, on est très loin de la limite de puissance. Tous les anneaux d'aubage que l'on peut ajouter autour et à l'intérieur d'une roue mobile ordinaire procurent un couple moteur supplémentaire, à la condition de ne pas dépasser certaines limites. Bien entendu, l'effet utile de ces anneaux décroît de plus en plus à mesure que l'on s'écarte davantage, en plus ou en moins de la valeur 0,66, qui correspond au maximum de rendement ; en sorte qu'il convient de se borner, dans cette voie, à des valeurs de ξ qui ne soient pas trop au-dessus de 1 ni au-dessous de 0,4. En supposant l'emploi possible d'un amortisseur, on arriverait à un coefficient de puissance voisin de 0,9, double du coefficient des turbines Jonval modernes, les plus puissantes.

Mais ce n'est pas encore là la limite de ce qu'il serait possible d'obtenir si, ayant de l'eau surabondamment, l'on n'avait pas à se préoccuper du rendement mécanique.

2° *Genre centrifuge.* — En étudiant de près le cas du genre centrifuge, nous constaterions que l'on peut pousser le coefficient de puissance jusqu'à la valeur de 0,52, le rendement mécanique restant supérieur à 0,70. On pourrait aller encore un peu plus loin avec des turbines coniques centrifuges, sans l'impossibilité

où l'on est de placer un vannage pratique sur ce genre de turbines.

3° *Genre centripète.*— Le genre centripète permet d'atteindre avec une vitesse relative de 0,80, un coefficient de puissance de 0,45, avec un rendement mécanique net s'approchant de 0,80. On pourrait, d'ailleurs, adjoindre à la partie cylindrique d'une turbine centripète une partie conique qui permettrait de porter le coefficient de puissance à la valeur de 0,85, le rendement mécanique moyen s'élevant à environ 0,73, et, avec l'application d'un amortisseur, on porterait respectivement ces chiffres à 0,90 et 0,78.

A titre de comparaison, disons que les turbines doubles du Niagara par exemple, ont un coefficient de puissance égal à 0,295 et que les turbines doubles de Rheinfelden ont un coefficient de puissance de 0,72, soit encore la moitié, 0,36, pour le cas de la turbine simple.

Turbines multiples.— Quand on ne parvient pas à la puissance désirée au moyen d'une seule roue mobile unilatérale, on a la ressource d'en associer plusieurs sur un même axe. De cette manière on peut atteindre, théoriquement tout au moins, telle puissance que l'on veut en embrochant sur l'arbre un nombre suffisant de roues simples. En pratique toutefois, on est limité par les conditions d'établissement de la machine. Ainsi pour le cas de l'arbre vertical, on s'est borné, jusqu'à présent, à deux turbines doubles sur le même arbre et, si l'arbre est horizontal, on n'a pas dépassé, que nous sachions, le nombre de 6 roues en 3 turbines doubles.

De remarquables exemples de ces turbines ont été donnés par les installations faites par la maison Escher-Wyss et Cie, à Chèvres, près de Genève, et à Rheinfelden, sur le Rhin. Plusieurs exemples de turbines multiples étaient présentés à l'Exposition, notamment par la maison Th. Bel de Kriens.

Turbines sur hautes chutes. Roues Pelton. — Avec la facilité que donne le courant électrique de transporter à des distances même considérables, l'énergie mécanique, l'on recherche toujours davantage les chutes de montagne, qui permettent des installations peu coûteuses, d'autant moins coûteuses générale-

ment que la hauteur de chute est plus grande. C'est ainsi que l'on s'est préoccupé d'utiliser des chutes de plus en plus élevées. Tout d'abord, il y a une dizaine d'années, les constructeurs avaient une certaine appréhension pour dépasser les hauteurs de chute de 200 mètres. Ils pouvaient craindre, en effet, que le rendement décrût et que l'usure des aubes fût rapide et, d'un autre côté, il convenait de se méfier des ruptures par l'effet de la force centrifuge dans les roues tournant à une vitesse périphérique élevée. En fait, nous connaissons plusieurs accidents survenus de ce chef. Mais peu à peu l'on a appris à utiliser des chutes beaucoup plus fortes : 400, 600 et même 900 mètres [1].

Pour ces grandes hauteurs de chute, quel est le genre de turbines qui convient le mieux ? On est à peu près d'accord maintenant pour préférer les roues à poches symétriques du genre « Pelton ». Les roues Girard, que l'on installait autrefois et que l'on installe d'ailleurs encore, leur cèdent le pas de plus en plus. Il y avait à l'Exposition un grand nombre de roues genre Pelton présentées par différents constructeurs français et suisses.

Ces turbines pour hautes chutes sont toujours précédées d'une conduite en tôle relativement longue par lequel le liquide est amené à la machine réceptrice. Dans cette conduite fermée, la vitesse moyenne de l'eau atteint jusqu'à 2 et 3 mètres par seconde, quelquefois même plus ; la force vive totale du courant en mouvement est alors considérable, et elle jette le trouble dans la régulation de la turbine.

Les coups de bélier occasionnés par les mouvements de fermeture du vannage peuvent alors, si on n'y prend pas garde, augmenter beaucoup, par moments, la pression du liquide en amont de la turbine. Et l'augmentation ayant lieu dans un temps très bref, prend le caractère d'un choc qui peut aller jusqu'à provoquer la rupture des tuyaux, comme cela s'est vu plusieurs fois. Il importe donc de se rendre un compte exact de l'effet produit par l'inertie des colonnes en mouvement. Ce phénomène, d'une théorie malheureusement difficile, en raison des éléments qu'il faut y faire figurer, a été étudié dans ces derniers temps par M. l'ingénieur

1. On peut citer une chute de 900 mètres à Vouvry (Valais) près du lac de Genève, qui vient d'être aménagée pour recevoir plusieurs turbines de 500 chevaux étudiées et construites par les ateliers de Vevey. La vitesse de rotation de ces turbines est de 1.000 tours par minute.

J. Michaud, puis par M. le professeur Stodola et enfin par MM. Prasil et Rateau, les auteurs de l'ouvrage auquel nous avons emprunté, ainsi que nous l'avons dit, ces considérations comparatives dont on ne saurait méconnaître l'intérêt (¹).

Réglage de la vitesse de rotation dans les turbines hydrauliques. — Un problème délicat à résoudre consiste à maintenir aussi constant que possible le nombre de tours par minute effectué par la roue mobile des turbines, quelles que soient les variations de la charge extérieure. Divers procédés ont été imaginés et mis en pratique pour répondre à cette obligation et, au premier rang de ces mécanismes, nous devons placer l'*hydro-tachymètre* de M. Ribourt, ingénieur à la Compagnie de Fives-Lille et professeur à l'Ecole centrale. Cet appareil a d'ailleurs reçu la consécration de la pratique, notamment dans l'installation d'éclairage électrique de la gare de Saint-Sulpice-Laurière, où l'on a utilisé une chute d'eau de 50 mètres de hauteur. Pour la première fois, la variation de la tension du courant produit n'a pas dépassé 1 volt, bien qu'il s'agit d'une machine de 120 chevaux.

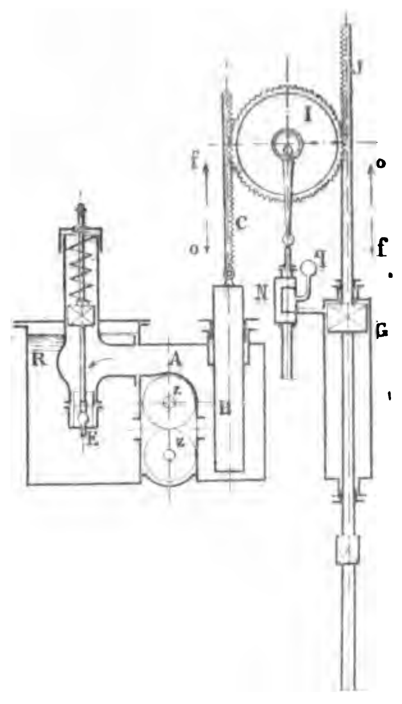


Fig. 9. — Hydro-tachymètre régulateur.

La régulation, dans l'appareil Ribourt, est obtenue (fig. 9), au moyen d'un circuit liquide fermé, huile et eau ordinaires, mis en mouvement continu par un petit compteur rotatif Z, qu'entraîne la turbine dont on doit produire la régulation. Au refoulement A de ce compteur volumétrique, qui comporte une très basse pres-

2. Les *Turbines hydrauliques à l'Exposition de 1900*, 5ᵉ livraison de « la *Mécanique à l'Exposition* ». Vᵛᵉ Ch. Dunod, éditeur, Paris.

sion, le liquide passe dans un ajutage E, muni d'un organe mobile qui en modifie automatiquement la section libre, de manière à transformer les variations de vitesse du compteur en variations très amplifiées de pression interne, ces deux facteurs, vitesse et pression, se trouvant liés par une fonction algébrique d'un degré élevé, du fait de la disposition matérielle de l'ajutage.

Pour utiliser ce phénomène au réglage de la turbine, un piston flotteur lesté B est immergé dans le liquide en circuit refoulé par le compteur et commande le tiroir de distribution N du relais G à piston hydraulique actionnant le vannage, par un dispositif d'asservissement pour le rappel à zéro constitué par deux crémaillères C et J engrenant avec le pignon suspendu I attelé au tiroir N.

Une partie essentielle de l'appareil est un train mobile qui comprend :

1° Un ajutage cylindrique calibré G (fig. 10) terminant la partie inférieure de la tubulure d'évacuation R du liquide refoulé par le compteur ; 2° des rayures triangulaires O divergentes disposées symétriquement dans l'ajutage et croissant en section transversale depuis zéro jusqu'à un maximum donné vis-à-vis la tranche inférieure de l'ajutage ; 3° un disque ou obturateur partiel mobile F présentant une arête vive circulaire, placé dans l'ajutage et suspendu à la tige I d'un piston E d'équilibre sur lequel appuie un ressort antagoniste T dont la tension peut être réglée par un écrou supérieur U.

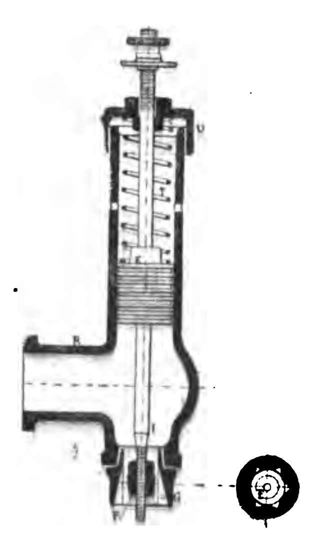


Fig. 10.

Fonctionnement de l'hydro-tachymètre. — Le piston E joue dans une partie ajustée du corps de la tubulure R de sortie du liquide en circuit et reçoit l'action de sa pression sur sa face inférieure qui tend par conséquent à le remonter en entraînant l'obturateur F dans l'ajutage à rayures divergentes ; le ressort T tend au contraire à faire descendre ce train.

En marche normale, le compteur actionné par la turbine refoule

le liquide en circuit qui s'écoule par l'ajutage, en franchissant la section libre laissée autour de l'obturateur ; le train mobile de l'hydro-tachymètre prend alors une position d'équilibre qui est fonction du volume du liquide débité, de la section de débit dans l'ajutage, de la pression intérieure du circuit, de la tension du ressort antagoniste faisant équilibre à l'action de cette pression sur le piston E, combiné avec l'obturateur F (différence des deux surfaces).

Chaque modification dans le débit du compteur se traduit par un changement de la position du train mobile et aussi par les modifications correspondantes des autres facteurs. On peut régler les dimensions de l'appareil et la tension du ressort de telle manière que, avec un régime de débit moyen résultant de la vitesse du compteur marchant à l'allure normale de la turbine, l'obturateur prenne une position d'équilibre d'une stabilité maxima et telle que, pour la plus minime variation d'allure en plus ou en moins, il se produise dans le circuit des variations de pressions subites et considérables, qui caractérisent la sensibilité de l'appareil employé comme régulateur de vitesse.


Fig. 11. — Turbine américaine avec régulateur à hydro-tachymètre Ribourt.

Pour un écart de vitesse de 1 0/0 en plus ou en moins, on observe une variation de pression dans le circuit de 0^k250 par centimètre carré, soit en plus ou en moins, 12,500 kilos sur le piston. Un levier multiplicateur établi dans le rapport de 2 à 1, est employé pour transmettre l'action du piston au tiroir du servo-moteur, de sorte que pour le faible écart de vitesse considéré, ce tiroir est soumis à un effort de déséquilibrage de 25 kilos qui l'oblige à se déplacer.

En fait, le régulateur Ribourt est constitué par un groupement d'organes élémentaires dont les dimensions sont indépendantes de l'importance de la turbine à régulariser ; on peut donc l'adapter à toute installation existante ou à créer ; il suffit d'y lier, par un asservissement mécanique très simple, les organes moteurs du vannage. Ce relais est constitué par un accumulateur statique de

très petite capacité et par une presse hydraulique à simple ou à double effet, alimentée par une petite pompe à pression. Toutes ces parties peuvent même être groupées d'une façon compacte avec l'appareil même afin de réduire autant que possible leur encombrement.

Résultats pratiques. — Le régulateur à hydro-tachymètre fonctionne depuis un temps déjà prolongé dans l'industrie; les relevés qui ont été faits sur ses conditions de marche, par des appareils enregistreurs, montrent que sa sensibilité effective répond bien à ce qu'en indique l'étude théorique.

Notamment, dans les conditions les plus difficiles de réglage, pour une turbine de faible puissance sous une basse chute, avec un vannage lourd et à longue course, les variations de vitesse sont limitées à 1 ou 2 0/0 en plus ou en moins de celle de régime avec des oscillations de quelques secondes de durée seulement, malgré des variations de résistance incessantes et s'élevant à 25 ou 30 0/0 de la puissance maxima. Ces résultats sont naturellement encore plus parfaits pour les turbines à haute chute où les mouvements des vannages sont très réduits, comme efforts et amplitudes.

Autres systèmes de réglage. — Il existe encore de nombreux autres mécanismes destinés à maintenir constante, malgré les variations de la charge, la vitesse de rotation des turbo-moteurs

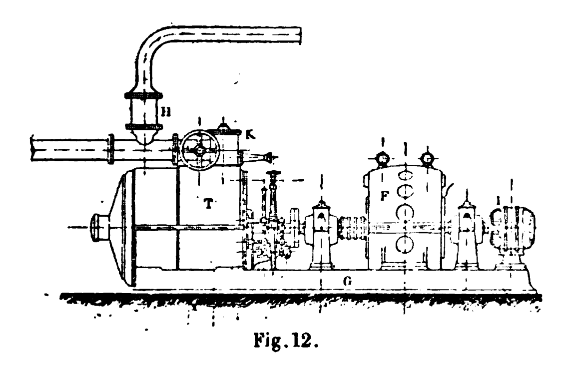


Fig.12.

à eau. Nous en décrirons encore un qui a fait ses preuves et est appliqué dans de nombreuses stations hydro-électriques suisses. Ce système, agissant au moyen d'une transmission générale, sur le servo-moteur des turbines.

Ce régulateur (fig. 12), destiné à maintenir constamment l'in-

tensité au point admis de 150 ampères est du type *à déclic* et il est actionné par un petit moteur à 2 pôles radiants, tournant à la vitesse d'environ 1.700 tours par minute et absorbant un ampérage de 50 ampères à vide, 60 ampères en charge, sous la tension de 2,3-2,4 volts qui est la tension d'équilibre du petit élément d'accumulateur branché en parallèle et qui forme réserve de courant pour le cas d'interruption sur la série.

En effet, dans ce cas, l'électro d'arrêt laisse tomber son armature sur le levier d'encliquetage du régulateur, lequel se met dans la position de fermeture de l'admission aux turbines, et le petit moteur continue à tourner, alimenté qu'il est par l'élément d'accumulateur.

Régulateur Woodward. — Dans la pratique, la régulation du mouvement des turbines hydrauliques est difficile à obtenir d'une manière rigoureuse. Quand elle s'opère par la manœuvre de vannages pesants ou très chargés, les efforts développés par un régulateur centrifuge ne peuvent y suffire. On a imaginé pour la réaliser, un certain nombre d'appareils qui utilisent, en général, les effets produits par les variations de vitesse sur un mécanisme simple, tel qu'un régulateur à boules, pour commander un relais ou servo-moteur mécanique, hydraulique ou électrique destiné à agir sur le vannage.

L'intervention d'un mécanisme auxiliaire entraîne évidemment un certain retard dans les effets du régulateur et, par suite, donne lieu à des oscillations de grande amplitude et de longue durée dans la vitesse, des solutions très élégantes ont été déjà proposées pour obvier à cet inconvénient; celle que nous allons faire connaître à l'aide des figures ci-jointes, mérite aussi de fixer l'attention.

Elle est due à M. Woodward, qui emprunte aux parties mobiles de la turbine même, l'énergie nécessaire pour les déplacements du vannage. Le mécanisme de transmission, disposé à cet effet, est pourvu d'un double cône de friction embrayé au moment voulu, dans le sens convenable par un régulateur centrifuge à boules. Ses dispositions sont telles que :

1° La transmission n'est embrayée que pendant l'action régulatrice;

2° Le vannage n'est pas servilement assujetti aux déplacements

du régulateur centrifuge. Un mécanisme compensateur a pour objet d'arrêter son mouvement avant que la vitesse soit redevenue normale et d'établir ce vannage dans la position correspondant au nouveau régime de marche, de façon à éviter les oscillations à longue période.

Le bâti de l'appareil supporte, par de forts paliers, deux arbres A et B (fig. 13) dont le premier reçoit par poulie et courroie le

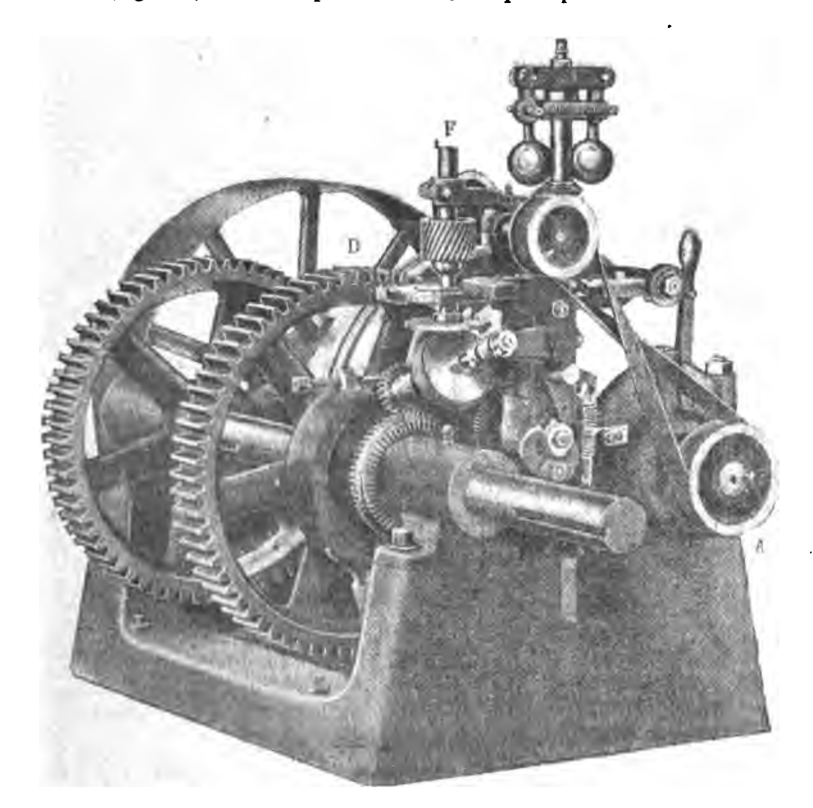


Fig. 13. — Régulateur Woodward.

mouvement de la turbine ; le second B qui entraîne par renvoi d'angle, l'arbre C de la commande du vannage, est mis en rotation par le premier à l'aide d'engrenages D, dont les pignons moteurs sont solidaires des cônes creux E' E'. Ceux-ci appartiennent à un embrayage double à friction, et les moyeux qui prolongent les pignons sont assujettis longitudinalement par des colliers, aux paliers voisins de l'arbre A. Celui-ci porte entre les cônes creux un

double cône plein E^2 et il peut coulisser à l'intérieur des moyeux et des paliers sous l'action d'un régulateur centrifuge. A cet effet, il reçoit entre deux bagues extérieures, la fourche de commande E^3.

Pour assurer la variabilité de sens de la rotation de l'arbre B en vue de la régulation, l'un des engrenages D est pourvu d'un pignon intermédiaire monté fou sur un axe fixé au bâti.

Un petit arbre vertical F (fig. 13), guidé par des colliers que porte le montant, est muni vers le bas d'un plateau de friction qui le fait reposer sur un cône à axe oblique. Cet arbre vertical reçoit la rotation de sa petite poulie par un renvoi quelconque qui, dans le cas de la figure, est un engrenage à vis sans fin. Il porte un disque circulaire dont les deux faces portent des cames, à chacune desquelles correspond une butée fixée à l'extrémité d'un bras

RÉGULATEUR WOODWARD

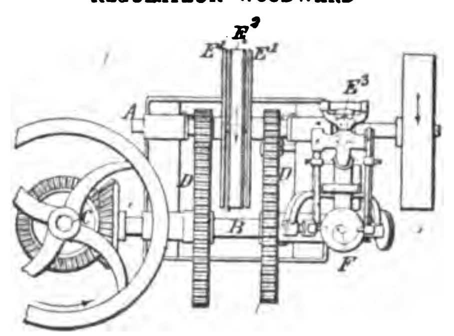


Fig. 14.

de la traverse. Un ressort plat, réglable à volonté, appliqué sur chaque butée, procure une certaine souplesse à l'action de ces cames.

L'arbre F repose sur un cône de friction oblique; l'axe de ce dernier tourne dans un support assujetti au bâti et il porte un pignon d'angle engrenant avec une roue de l'arbre B. Ce même axe est fileté dans le moyeu du cône et dans un sens tel, par rapport à la rotation du disque à cames *a*, que durant l'immobilité de cet axe, la friction ramène constamment le cône au centre du plateau. Quand une variation de vitesse se produit, une accélération par exemple, l'ensemble *b*, *c*, *d*, oscille, et la butée supé-

rieure *b* prend contact avec la came correspondante du disque *a*; mais la rotation qui en résulte pour l'arbre B, par suite de la mise en action de l'embrayage $E^1 E^2 E^3$, se communique à l'axe oblique du cône de friction et fait descendre ce dernier ainsi que l'arbre vertical F; alors, la came supérieure du disque *a* abandonne sa butée *b*, et les cônes $E^1 E^2$ se débrayent au moment où le vannage occupe la position correspondant, pour la nouvelle charge, à la vitesse normale de la turbine. La régulation ne subit donc pas les effets retardateurs des mécanismes. Pendant que s'effectue l'absorption de la puissance vive, la roue conique de compensation revient au centre du plateau de friction.

Tel est le dispositif employé pour empêcher le vannage de dépasser la position correcte et, en particulier, pour supprimer les chances d'excès de vitesse.

L'appareil que montre la figure 13 est un des plus grands qu'ait établis la Woodward Governor Company, il comporte des cônes de friction de 60 centimètres de diamètre et de 30 centimètres de profondeur, qui peuvent transmettre 690 kilogrammètres par seconde pour la manœuvre du vannage.

Tels sont les principaux dispositifs employés pour le réglage automatique des turbines ; dans le chapitre suivant nous examinerons le mode de fonctionnement des différents modèles actuellement en usage dans l'industrie.

CHAPITRE IV

Les turbines hydrauliques modernes.

Les turbines modernes sont des moteurs hydrauliques dont l'axe est ordinairement vertical. L'eau agit par son poids et sa vitesse sur des aubes convenablement disposées. D'après la direction suivant laquelle l'eau agit, on les distingue en *turbines radiales* et *turbines axiales* (turbines Fourneyron et turbines Fontaine) ; chacune de ces catégories peut se subdiviser à son tour en turbines à *pleine injection* et turbines à *injection partielle ;* selon qu'elles reçoivent l'eau sur la totalité ou sur une ou plusieurs parties de leur contour. D'après le mode d'action de l'eau, on peut encore les partager en *turbines d'action*, dans lesquelles le travail mécanique est uniquement produit par la puissance vive de l'eau (la vitesse étant seule utilisée) et *turbines de réaction* dans lesquelles, concurremment avec la puissance vive, agit principalement la simple pression de l'eau.

Dans toutes les turbines, l'eau est amenée dans une partie fixe, munie d'aubes courbes ou directrices, qui guident l'eau à son entrée dans la roue mobile ou turbine proprement dite. Entre la couronne fixe et la roue mobile existe un jeu qui varie depuis 3 à 4 millimètres pour des constructions soignées, jusqu'à 5 et 8 millimètres et même davantage pour les turbines d'action. Pour les turbines à réaction, la pression de l'eau, à l'endroit où existe le jeu entre la roue mobile et les orifices distributeurs, doit être égale, ou plutôt légèrement supérieure à la pression extérieure régnante ; les pertes de travail provenant de la sortie de l'eau par ce jeu étant bien plus faibles que celles qui se produiraient par les tourbillonnements dus à une aspiration d'eau du dehors au dedans. Les turbines à réaction peuvent travailler aussi bien noyées qu'à l'air libre ; les turbines à injection partielle, dont les

canaux contiennent toujours de l'air, doivent être disposées hors de l'eau.

Dans les turbines à réaction, il est indifférent, pour une chute donnée, que la chute d'eau presse au-dessus de la turbine ou agisse au-dessous par aspiration; ceci explique pourquoi certaines turbines ont pu être disposées à 6, 7 et 8 mètres (théoriquement $10^{m},34$) au-dessus du niveau d'aval.

On préfère les turbines aux roues hydrauliques (qui sont plus lentes) dans le cas où l'on veut obtenir une rotation rapide sans beaucoup d'engrenages (le nombre de tours dépasse rarement 300 par minute); cependant, leur application dépend aussi de la nature des chutes d'eau dont on dispose. L'eau est amenée à la turbine dans des canaux ordinaires, et pour de hautes chutes, au moyen de conduites en fonte ou en tôle; la vitesse d'arrivée dans la turbine ne doit pas dépasser un mètre.

Parmi les *turbines radiales*, on peut citer la turbine de Fourneyron, celle de Cadiat (identique à celle de Fourneyron, mais sans couronne fixe), la turbine de Canson; la roue Poncelet se rapproche assez des turbines radiales.

Parmi les *turbines axiales*, la turbine Jonval-Kœchlin, celles de Fontaine et de Girard. Nous nous bornerons à dire quelques mots de ces derniers.

Turbines Jonval-Kœchlin. — Dans ce système, les canaux formés par les aubes de la roue mobile, ont une largeur constante de 8 à 10 millimètres plus grande que celle de la couronne fixe. Le rendement atteint 76 0/0 quand l'eau agit sur tout le pourtour, mais dans le cas où l'action de l'eau ne se produit que sur une partie de la circonférence, il s'abaisse en raison directe du carré du débit. Le plus grand diamètre donné jusqu'à présent à une turbine Jonval est de $3^{m},50$, la largeur totale de la couronne atteint $0^{m},60$ et la roue mobile comporte 3 couronnes; c'est-à-dire qu'elle se compose de deux parties de $0^{m},30$ de largeur. Dans ces conditions, avec une hauteur de chute de $1^{m},50$, le débit est de 10 mètres cubes, ce qui peut être considéré comme un maximum pour une turbine unique.

On emploie la turbine Jonval pour une certaine puissance d'eau existante; tout le débit d'eau disponible n'est pas absorbé par le moteur et lors des basses eaux il reste une quantité d'eau suffi-

sante pour l'alimentation. On peut établir ce genre de turbine jusqu'à une hauteur de 8 mètres au-dessus du niveau inférieur, mais il présente l'inconvénient d'un réglage difficile de l'effet de l'eau sur les couronnes.

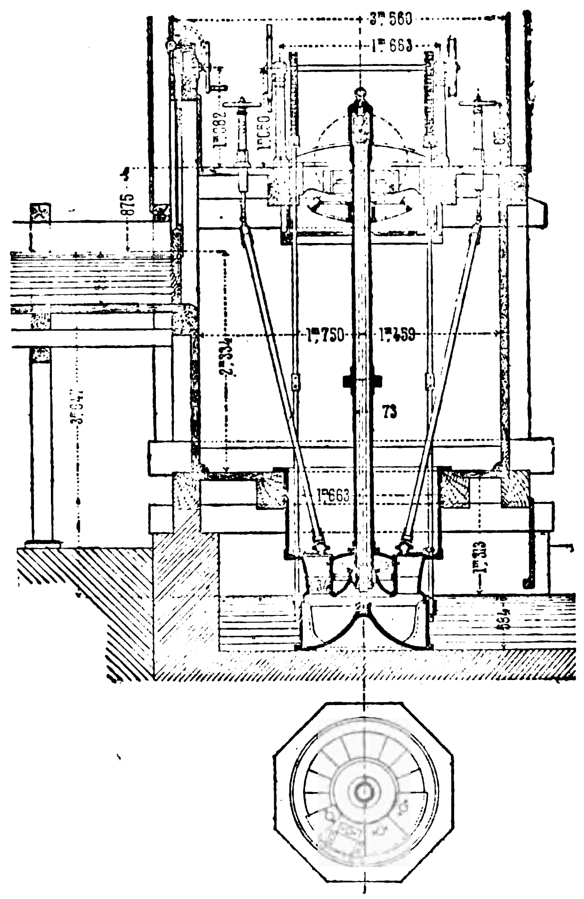


Fig. 15. — Coupe d'une turbine Jonval.

Turbines Fontaine et Girard. — Ce sont des turbines d'action à libre déviation ; l'eau agit sur la totalité ou sur une partie seulement du pourtour. Elles sont particulièrement appréciées pour l'utilisation de débits variables sous une chute sensiblement constante. Les axes des types à injection partielle sont tantôt verticaux, et alors l'eau arrive par dessus dans les canaux

de la roue mobile, et tantôt horizontaux, auxquels cas l'eau est donnée par la circonférence intérieure et ces turbines sont en même temps radiales.

Le savant hydraulicien Girard avait fait connaître vers 1860 un système de turbine à axe horizontal, dont le modèle existe encore au Conservatoire des Arts et Métiers, et qui présentait des dispositions originales. La roue, qui affecte la disposition d'une roue de ventilateur à lames hélicoïdales très serrées, est à moitié immergée dans l'eau et enfermée à l'intérieur d'une cuve ou huche en bois. La transmission du mouvement de rotation s'opère par engrenages d'angle. Ce système, malgré la simplicité de sa construction, est abandonné, le rendement ne s'élevant pas, dans les meilleures conditions de marche à plus de 60 0/0 et on en est revenu aux turbines à action parallèle ou à action centrifuge dont nous parlerons un peu plus loin.

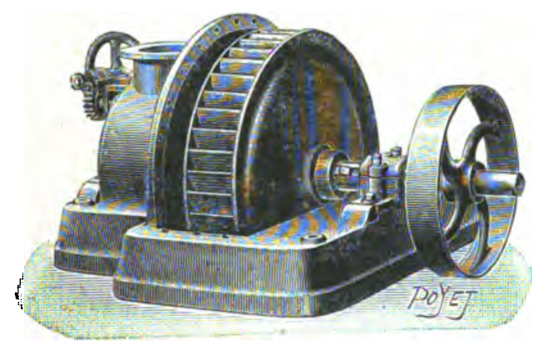


Fig. 16. — Turbine Girard.

Notre figure 16 représente une variété de turbine partielle, système Girard, à axe horizontal. Cette turbine utilise, sous une chute de 40 mètres une quantité d'eau de 10 à 25 litres par second, produisant de 4 à 10 chevaux-vapeur. L'eau de chute est introduite par cinq canaux fixes de 11 millimètres d'ouverture suivant la largeur et de 30 millimètres de hauteur dans le sens du rayon. L'aubage mobile est en bronze, boulonné à un croisillon en fonte, claveté sur l'arbre. Les orifices d'introduction peuvent être ouverts ou fermés en plus ou moins grand nombre à l'aide de la vanne cylindrique. La largeur du canal d'arrivée est de 250 millimètres. La turbine est munie d'orifices de ventilation latéraux.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, ces divers genres de turbines se construisent soit avec axe horizontal, soit à axe vertical. Celles-ci peuvent recevoir l'action de l'eau tantôt par dessus tantôt en dessous. Les turbines où l'eau agit sur tout le pourtour sont souvent noyées, mais mieux suspendues dans l'air libre (Fourneyron) ; quant aux turbines à action partielle de l'eau, ou à libre déviation, elles doivent toujours être disposées dans l'air : il faut éviter avec soin qu'elles plongent dans l'eau d'aval. Pour régler la dépense, dans le cas de débits variables, il existe différents moyens : on peut faire usage de turbines multiples, c'est-à-dire formées de deux ou plusieurs couronnes, et dont une ou deux parties peuvent se fermer au moyen de vannes tiroirs circulaires ; on peut encore, pour les turbines radiales à injection totale, réduire uniformément sur tout le pourtour des hauteurs de la couronne fixe et de la roue mobile ; pour turbines axiales à injection partielle ou totale, un certain nombre de canaux distributeurs peuvent être fermés à l'aide de clapets ou de vannettes, ou par le moyen d'un secteur circulaire formant vanne ou tiroir.

Turbine centripète Hercule-Progrès. — Au premier rang des constructeurs français qui ont fait du moteur hydraulique une étude consciencieuse et approfondie, nous devons placer MM Singrün frères d'Epinal, qui ont propagé en France le modèle « Hercule », dont la caractéristique est un rendement extrêmement élevé aux divers degrés d'admission. Quoique limités par l'exiguïté de ce chapitre qui nous force à seulement effleurer le sujet, nous devons dire quelques mots de l'*Hercule-Progrès* que les derniers perfectionnements on amené à une incontestable supériorité à tous égards sur les turbines basées sur un principe analogue.

Dans ce remarquable système, l'eau est introduite horizontalement, dans une direction centripète ; elle agit d'abord sur les aubes de la couronne part sa force vive, puis, la pesanteur intervenant, cette eau finit son travail par réaction dans une direction parallèle à l'axe, et c'est l'action combinée de ces deux forces : impulsion et charge de l'eau, sur des aubes à double courbure, qui permet l'utilisation complète et rationnelle d'une chute d'eau. En outre, la force centrifuge qui est souvent une cause de perte, s'ajoute au contraire, dans cette turbine à l'action de l'eau sur

les aubes ; la pression effective, à la circonférence de la roue, acquiert ainsi une valeur égale à peu près à la moitié de celle de l'eau dans la chambre d'alimentation, valeur que le calcul indique comme étant la plus favorable au rendement. Utilisant ainsi de la manière la plus complète la force de l'eau par la combinaison des deux éléments concourants, puissance vive et réaction, profitant

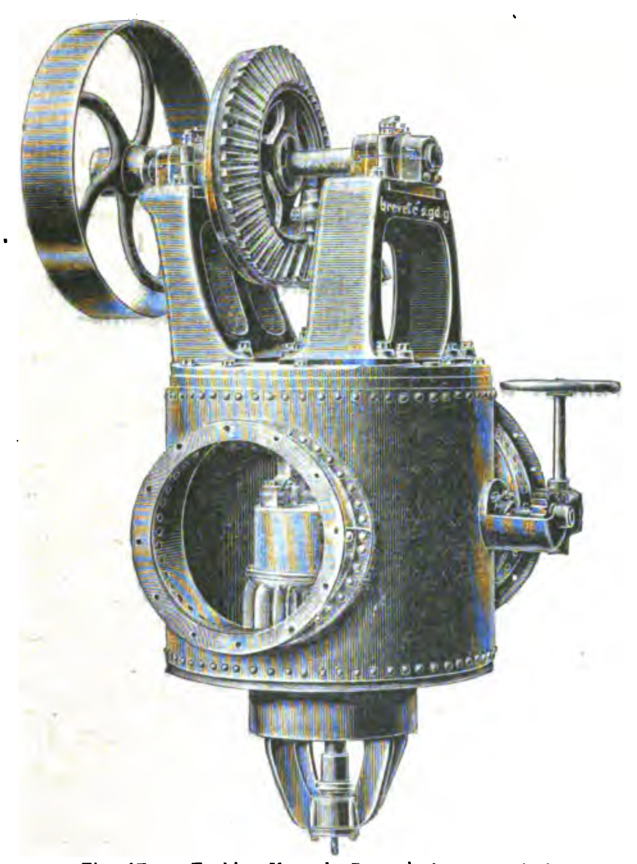


Fig. 17. — Turbine *Hercule-Progrès* à axe vertical.

en outre de la force centrifuge, il est naturel d'obtenir des rendements très élevés, atteignant couramment 80 p. 100.

En ce qui concerne l'effet utile avec admission partielle, nous dirons que la résolution de ce problème a été la préoccupation constante de tous les ingénieurs qui se sont occupés de la construction des moteurs hydrauliques, et la difficulté a toujours été

de trouver une disposition, à l'aide de laquelle on puisse *mettre la capacité du récepteur en rapport constant avec le volume de l'eau disponible*, quand celui-ci est susceptible de grandes variations, *sans changer les conditions de passage du fluide dans les aubes.*

Or, en général, pour la marche avec admission partielle, la réduction du débit n'est obtenue qu'en fermant complètement un seul ou un plus grand nombre des orifices du distributeur, ou bien en diminuant partiellement la section de tous les orifices ; mais dans les deux cas la capacité de l'aubage ne varie pas, et le rapport entre la section des orifices d'admission et celle du récepteur est modifié, de sorte que le fluide arrive subitement *dans un espace trop grand et disproportionné avec la section de l'orifice qui le fournit.*

Il s'en suit une déviation désordonnée de la veine liquide, des tourbillonnements, et l'action des filets sur les aubes est en partie annulée.

En d'autres termes, lorsque l'eau ne remplit pas complètement l'intervalle des aubes, qu'elle ne coule pas à *gueule-bée*, une grande partie des filets fluides s'échappe sans avoir rencontré le récepteur, et il en résulte une perte d'effet utile correspondante.

En outre, dans certaines turbines, avec vannes à jalousies ou à lumières, par exemple, la fermeture partielle de la vanne modifie non seulement le rapport entre les orifices d'admission et la capacité du récepteur, mais encore la direction d'injection de la veine liquide ; les conditions pour lesquelles la turbine a été établie se trouvent donc complètement changées, et l'effet utile considérablement réduit.

Il en est de même des systèmes dans lesquels les directrices du distributeur sont mobiles et produisent l'obturation en venant s'appuyer l'une contre l'autre.

Dans toutes ces turbines les filets d'eau mal dirigés et très divisés, sont laminés entre les parois resserrées de la vanne et celles du distributeur, ce qui occasionne une nouvelle résistance due au frottement, qui vient encore s'ajouter aux deux causes précédemment indiquées.

Toutes ces causes font que, bien souvent on a préféré la roue hydraulique, malgré ses désavantages, à la turbine ainsi cons-

truite et bonne seulement quand l'eau est en abondance. Voyons maintenant comment, dans la turbine “ *Hercule Progrès* ” ce problème si compliqué a été résolu d'une manière aussi simple qu'ingénieuse.

Chaque aube de la turbine est divisée en hauteur en un certain nombre de compartiments au moyen de petites cloisons directrices venues de fonte avec elle. La vanne qui se lève verticalement entre le distributeur et le récepteur découvre un ou plusieurs compartiments de l'aubage dont la capacité reste ainsi toujours proportionnelle à l'admission. Elle porte une série de directrices venues de fonte dont le but est d'éviter à sa partie inférieure la contraction des filets liquides en hauteur. En conséquence, quel que soit son degré d'ouverture, ces directrices viennent se placer sur le prolongement des petites cloisons des aubes et la vanne fluide reste parfaitement guidée et conserve sa direction normale sans déviation, sans laminage ni tourbillonnement, aussi bien pendant son passage entre les directrices du distributeur et sous la vanne que dans l'aubage. On peut, pour ainsi dire, considérer la nouvelle turbine Hercule-Progrès comme étant composée de plusieurs turbines superposées, — quoique formée d'un seul aubage, — travaillant chacune séparément en plein. Les con-

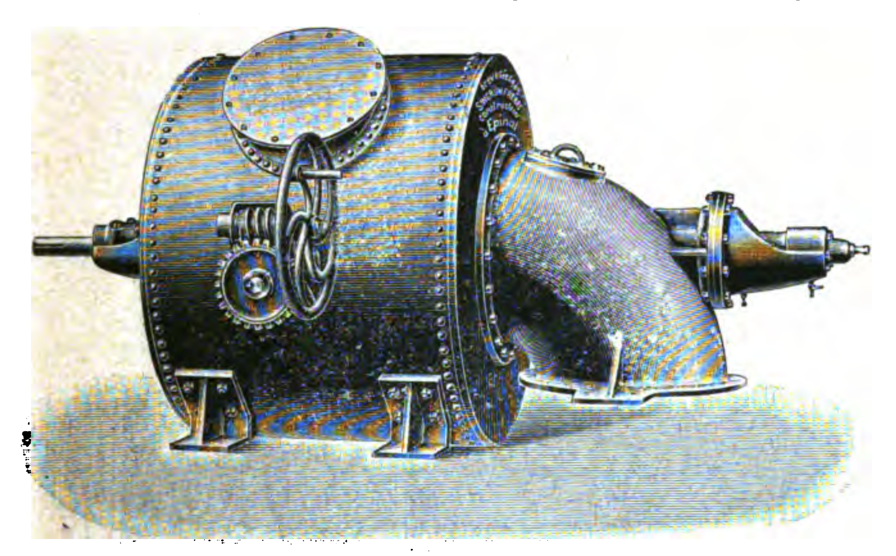


Fig. 18. — Turbine *Hercule-Progrès* à axe horizontal.

ditions du travail de l'eau dans les aubes n'étant pas modifiées, et les principales causes de la diminution de l'effet utile se trouvant écartées, il en résulte que, malgré que l'admission soit diminuée, le rendement demeure très élevé.

D'autre part, lorsque par suite de l'élévation du niveau des eaux d'aval la turbine se trouve noyée, son rendement n'en est pas pour cela altéré, et elle reste dans de bonnes conditions de marche tant qu'il existe une différence de niveau entre l'amont

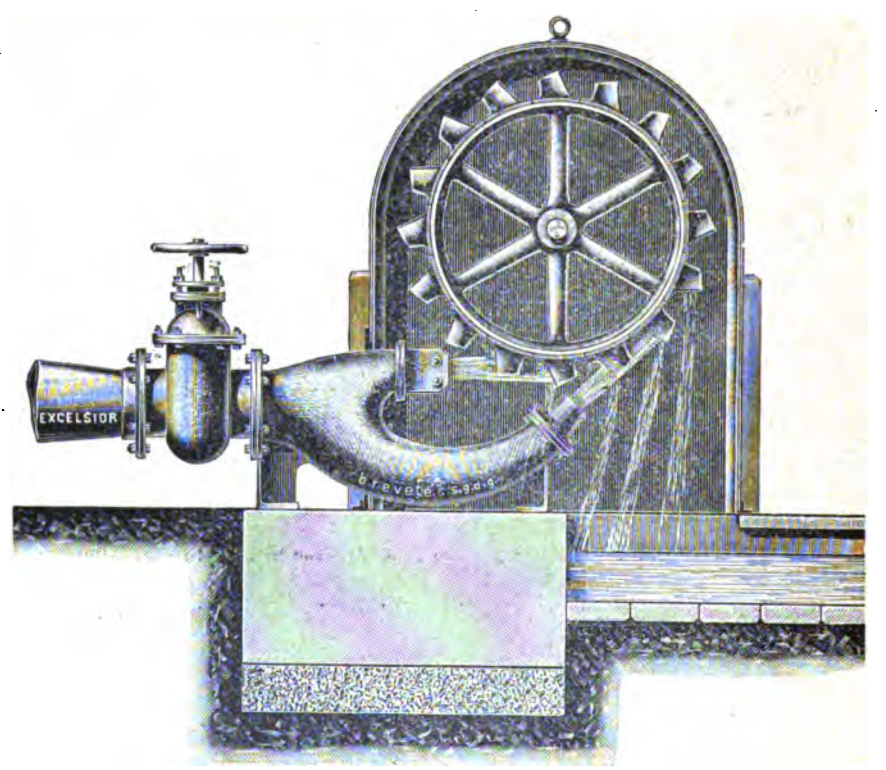


Fig. 19. — Roue-turbine spéciale pour hautes chutes et faibles débits construite par les Etablissements Singrün frères d'Epinal.

et l'aval. Cette précieuse qualité permet de placer la turbine tout au bas de la chute et d'obtenir ainsi le maximum d'effet utile. Si, en temps de crue, le niveau d'aval monte, la turbine utilise toute la charge qui reste disponible et son rendement n'en est pas affecté ; si, au contraire, le niveau d'aval baisse, elle travaille

partiellement par aspiration au moyen du tube de décharge qui plonge dans l'eau, et la chute normale se trouve ainsi augmentée par l'abaissement du niveau d'aval justement au moment où l'eau fait défaut.

Enfin cette turbine présente une très remarquable régularité de marche qui est due au principe même d'après lequel elle est établie, aussi l'adjonction d'un appareil régulateur automatique est-elle superflue, sauf dans certains cas exceptionnels.

La turbine « Hercule-Progrès » se construit avec axe vertical ou avec axe horizontal simple ou jumelé, avec ou sans huche métallique, et cette disposition est souvent fort avantageuse, surtout lorsqu'il s'agit de la production de l'électricité. Il est facile, en effet, avec un axe de commande disposé horizontalement, de placer directement en bout de l'arbre de la turbine une dynamo, un alternateur, une pompe, etc., lorque la vitesse de ces machines est la même que celle de la turbine. On peut aussi placer sur l'arbre de la turbine une poulie ou un pignon de diamètre approprié, pour commander par courroie ou par engrenages une transmission ou une machine à n'importe quelle vitesse désirée.

L'axe des turbines peut être placé jusqu'à 6 mètres au-dessus du niveau d'aval, pour les chutes d'une certaine hauteur, de façon à les mettre complètement en dehors de la portée des crues, mais il est néanmoins préférable de placer la turbine aussi bas que possible.

Un tuyau d'aspiration prolonge le coude de décharge et doit plonger dans l'eau d'aval de façon à éviter toute introduction d'air par le bas afin que la turbine ne se désamorce pas.

Dans ces conditions elle travaille par pression dans la partie de la chute située plus haut que le moteur, et par aspiration dans la partie comprise entre la turbine et le canal de fuite.

La chute est ainsi utilisée tout entière, absolument comme si la turbine était placée tout au bas de la chute, à la condition toutefois qu'elle fonctionne à pleine admission, ou bien à admission très peu réduite, car, malgré toutes les précautions et tous les artifices, et *quel que soit d'ailleurs le système de turbines employé*, le vide dans un tuyau d'aspiration est d'autant moins parfait que l'admision de l'eau sera plus réduite, puisque même à admission totale l'eau contient encore de l'air en suspension.

Cette circonstance réduit un peu le rendement des turbines

placées horizontalement plus haut que le niveau d'aval et, si l'on y ajoute la perte de charge due au frottement de l'eau à son passage dans le coude et dans le tuyau d'aspiration, l'effet utile de ces moteurs est un peu inférieur à celui des turbines à axe vertical qui sont placées tout au bas de la chute, et dans lesquelles ces éléments de pertes, qu'on peut estimer de 2 à 5 p. 100, n'existent pas.

Malgré cette apparente diminution de force — surtout lorsque la question d'économie d'eau avec admission partielle n'est pas d'une importance absolue — on a souvent intérêt à préférer les turbines à axe horizontal à celles à axe vertical, puisque, par suite de l'absence de tous les engrenages, courroies, ou de toute transmission intermédiaire, qui sont aussi une cause de résistances et de pertes, le rendement final est le plus souvent maintenu et compensé par une réelle simplification d'organes.

Roue-turbine « Excelsior » des Etablissements Singrün frères. — Le modèle que nous venons de décrire reçoit l'eau sur toute sa circonférence, possède une plus grande capacité et développe avec le plus petit diamètre et la plus grande vitesse, plus de force que tout autre moteur. Elle peut, en outre, être placée, comme nous l'avons dit, plus haut que le niveau d'aval, en dehors de la portée des crues, et travailler partiellement par aspiration. Ces diverses qualités sont très importantes pour les basses et moyennes chutes, dans lesquelles on cherche à obtenir une grande force et une vitesse avantageuse, mais lorsqu'il s'agit d'utiliser des chutes élevées avec des débits très faibles, la vitesse qu'on obtiendrait avec des diamètres très réduits serait telle qu'elle ne correspondrait plus avec les besoins d'une bonne marche industrielle. On est donc conduit à employer, dans ce cas, des turbines de plus grand diamètre ne recevant l'eau que sur une partie de leur circonférence, mais ces modèles doivent être placés tout au bas de la chute et ne peuvent travailler par aspiration. C'est dans ces circonstances que les turbines à action radiale, genre Girard ou dérivés peuvent rendre les meilleurs services, et la roue-turbine « Excelsior » (genre Pelton) à action tangentielle, construite par les Etablissements Singrün permettent d'obtenir un rendement très élevé (fig. 19 et 20).

Pour obtenir sous de très hautes chutes surtout, des conditions

de marche satisfaisantes, on se heurte à de nombreuses difficultés qui ont été surmontées affirment les constructeurs. Dans le modèle que nous décrivons, la roue est à axe horizontal, et sa circonférence est pourvue d'aubes réceptrices. L'arbre de cette roue est maintenue par deux ou plusieurs paliers qui reposent, soit sur des massifs en pierre, soit sur une charpente en bois ou en fer, soit encore sur un bâti en fonte.

L'eau est amenée à la roue par on tuyau muni à sa partie inférieure d'un robinet-vanne placé devant un injecteur à un ou plusieurs ajutages.

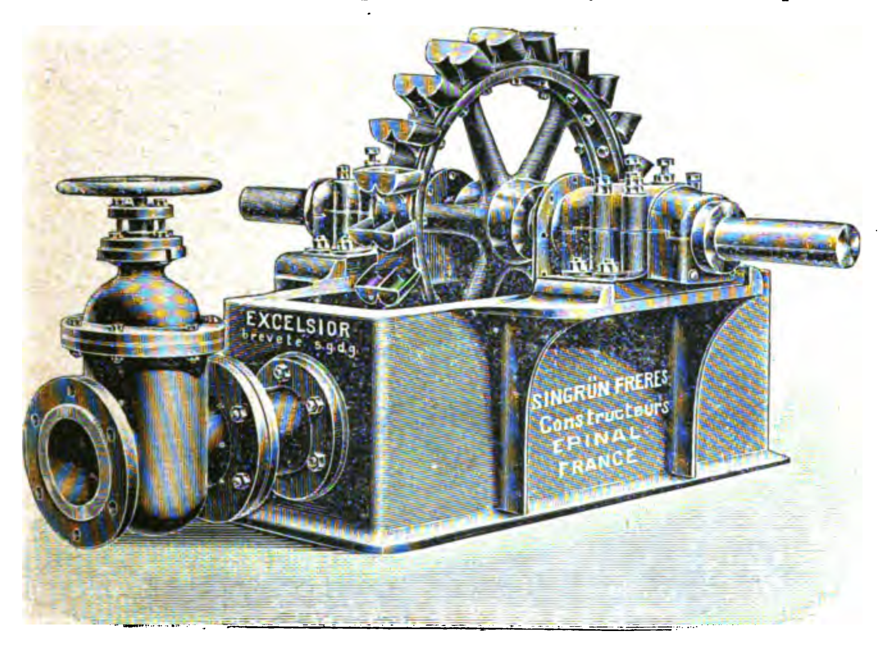


Fig. 20. — Roue-turbine à axe horizontal pour hautes chutes, de Singrün d'Epinal.

La veine liquide, en traversant ces ajutages, est dirigée sur les aubes, à la partie inférieure de la roue, tangentiellement à leur ligne médiane, et agit normalement à la direction du jet, par sa force vive successivement sur chaque aube.

Contrairement à la plupart des turbines pour hautes chutes employées jusqu'ici, dans lesquelles l'eau est admise à l'intérieur de la roue pour s'échapper à la périphérie, et dans lesquelles l'effort se reporte tout entier sur les paliers sur lesquels il exerce une pression considérable, au détriment du rendement et de l'en-

tretien, cet effort et cette pression sur les paliers sont réduits à leur plus simple expression dans cette roue-turbine, à cause de la direction normale et tangentielle du jet, les frottements et les résistances passives sont diminués au bénéfice du rendement.

Les aubes de la roue ont la forme d'un godet double, dont la génératrice présente à la veine liquide une arête vive qui la divise en deux, et la dévie vers chaque côté de la roue pour lui donner une direction perpendiculaire à la direction primitive. L'eau, en continuant son trajet, quitte les aubes sous un angle très faible et strictement suffisant à son évacuation.

Les dimensions des aubes sont calculées, pour chaque modèle de turbine, suivant la hauteur de chute et l'importance du débit, de manière à ce que l'eau, une fois en contact avec l'aube, suive des courbes qui la conduisent rationnellement jusqu'à l'extrémité extérieure qu'elle quitte, à ce point, avec une vitesse sensiblement égale à celle de la roue, de telle sorte que la force vive de l'eau est utilisée le plus complètement possible.

Des applications, plus ou moins heureuses, de roues tangentielles ont été faites dans différents pays, mais ce système de moteurs n'a pas eu tout le développement dont il est susceptible, surtout à cause des difficultés inhérentes au système d'injecteurs, d'ajutage ou de réglage du débit employé.

Le plus souvent on a employé des ajutages à section de sortie constante, dans lesquels les filets liquides peuvent être bien dirigés, mais l'inconvénient principal de ce système est qu'il ne permet de maintenir la vitesse du moteur, lorsqu'il y a des variations de charge, qu'en étranglant l'eau dans le robinet d'arrêt ou au moyen d'un papillon, pour diminuer la pression.

Le résultat de cette disposition est que l'on n'utilise pas toute la charge, que la quantité d'eau nécessaire pour produire la force variable est plus grande que si cette eau agissait sur l'aubage avec toute sa force vive et que le rendement est beaucoup diminué lorsque le moteur ne développe pas toute sa force.

Pour remédier partiellement à cet inconvénient l'on peut avoir une série d'ajutages interchangeables, plus ou moins grands, dont la section fixe corresponde approximativement à la force demandée, mais, pour poser ou remplacer ces ajutages, il faut arrêter le moteur, ce qui n'est pas toujours possible, surtout lorsqu'il actionne, par exemple, un éclairage électrique.

On a aussi cherché à employer des ajutages ou des orifices distributeurs dont la section peut être réglée dans une certaine mesure soit au moyen d'une ou plusieurs parois mobiles, qui se déplacent, tournent autour d'un axe, glissent ou coulissent en partie ou en totalité, soit au moyen d'ajutages à aiguille centrale qui rendent le jet tubulaire, mais les principaux inconvénients de ces dispositions sont de dévier la veine liquide de sa direction normale, d'en supprimer le parallélisme, de modifier l'angle d'injection, de déplacer le centre de pression, de creuser et d'étrangler le jet, et il résulte de toutes ces dispositions une augmentation des frottements et une diminution de rendement, surtout à admission partielle.

C'est dans le but d'obvier à ces divers inconvénients que MM. Singrün ont étudié un nouvel ajutage réglable dont la pratique a sanctionné les incontestables qualités. Avec cet ajutage, la section du jet peut être réglée instantanément, depuis le plus fort jusqu'au plus faible débit, et même jusqu'à la fermeture complète. La charge qui agit sur les aubes est conservée tout entière quelle que soit la réduction du débit ; la veine liquide reste parallèle et compacte sans aucune déviation, déformation ou changement de direction ; enfin l'angle et le centre d'injection restent invariables et conservent leur valeur et leur position les plus favorables malgré la réduction apportée dans l'admission.

Ce système présente donc de très réels avantages, surtout pour les hautes chutes, et les applications qui en ont été réalisées montrent qu'il tend à remplacer les anciens types de turbines, en raison de sa solidité, de sa simplicité et de sa facilité d'installation qui lui permettent d'utiliser des chutes de 800 mètres de hauteur, enfin par l'élévation de son rendement qui se maintient malgré les variations les plus grandes de débit et de puissance.

Autres modèles de turbines hydrauliques. — Plusieurs maisons de construction se sont fait une spécialité de l'étude et de la fabrication des turbo-moteurs hydrauliques appartenant à l'une ou l'autre des diverses variétés décrites au cours de ce chapitre. Citons parmi les ingénieurs qui ont créé des types remarquables ou intéressants MM. Ch. Vigreux, Malliary, Brault et Teisset de Chartres et Laurent-Collot de Dijon (fig. 23).

En Suisse, les turbines hydrauliques les plus estimées sont

celles qui sortent des ateliers de construction de Vevey. Les figures 21 et 22 représentent deux modèles de cette Société. Les turbines de Vevey fonctionnent, avec des chutes de hauteur quelconque ; leurs organes sont calculés en raison de la pression qu'ils auront à subir et ils fournissent un rendement très remarquable qui les

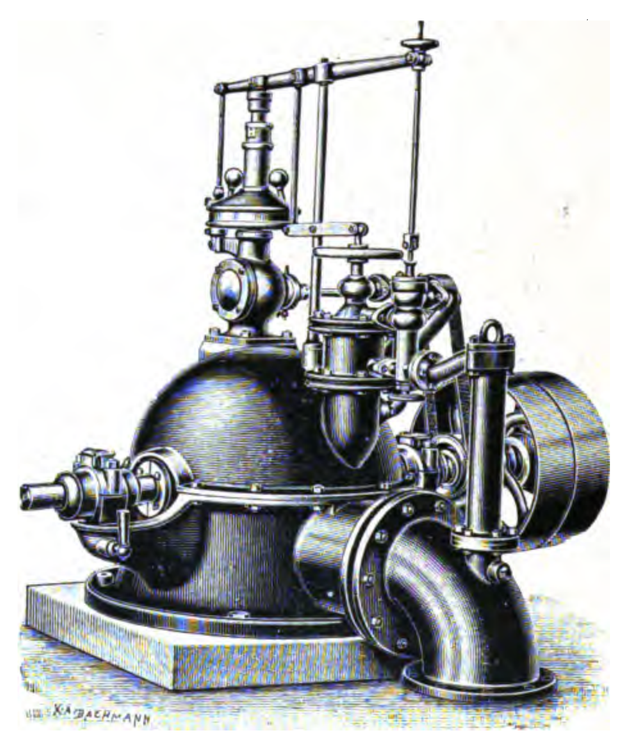


Fig. 21. — Turbine hydraulique Francis, avec régulateur, des ateliers de construction de Vevey.

a fait choisir comme moteurs dans un grand nombre d'installations hydro-électriques de la région des Alpes.

La France est un des premiers pays du monde au point de vue de la puissance hydraulique, car on peut évaluer la force disponible, rien que dans les Alpes et les Pyrénées, à plus de 10.000.000 de chevaux-vapeur, sur lesquels, actuellement 500.000 à peine sont utilisés. L'Italie dispose d'environ 2.500.000 chevaux et en utilise déjà près de 400.000 ; et la Suisse, pays de montagnes et de cascades par excellence, doit également devenir un centre industriel d'une activité remarquable. Mais ce n'est pas tout de disposer

de cette puissance économique, il faut avoir l'outil, la machine motrice, susceptible d'utiliser cette puissance.

Le moteur actuel, employé universellement et qui a remplacé l'antique roue à palettes de nos pères, est la turbine, dont de nombreux systèmes existent aujourd'hui et peuvent utiliser toutes chutes d'eau, marchant sous basse ou haute pression, à grande ou petite vitesse ; certaines d'entre elles arrivent à atteindre couramment des rendements qu'il était, pour ainsi dire, impossible de prévoir jusqu'à présent.

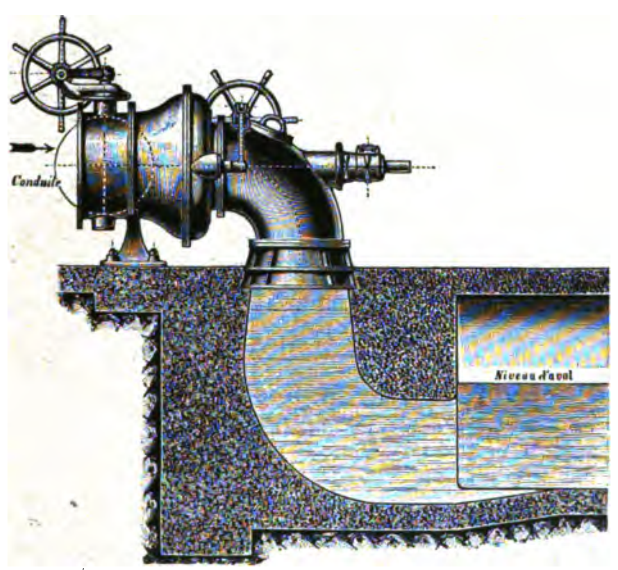


Fig. 22. — Turbine des ateliers de Vevey (Coupe).

Beyer. — La maison Beyer construit un type de turbines « siphoïdes » à axe horizontal, qui a l'avantage, par suite de l'emploi du tube de succion, d'utiliser en tout temps toute la chute disponible, comptée entre le niveau supérieur d'amont et le niveau du canal de fuite, quelle que soit la hauteur de ce dernier niveau qui est quelquefois très variable ; de cette façon, le rendement général de ce moteur est également excellent.

Dans ce modèle de turbine, l'admission d'eau se règle, soit par un levier, soit par vis sans fin avec engrenage. Dans l'un et l'autre cas, on peut y adapter un régulateur qui donne automatiquement l'entrée de l'eau suivant la force absorbée.

Turbines centripètes A. Gandillon. — Les turbines américaines centripètes introduites en France il y a quelques années ayant donné des résultats satisfaisants dans les cas assez fréquents où la turbine se trouve *noyée*, M. Gandillon, ingénieur-constructeur à Senlis a étudié un type de ce genre mais dans lequel ont été évités la plupart des inconvénients que l'on reproche à ces turbines, qui sont fabriquées en fonte, et sont, fréquemment, mises hors de service par les corps durs entraînés dans l'eau, qui brisent en même temps les directrices et les aubes.

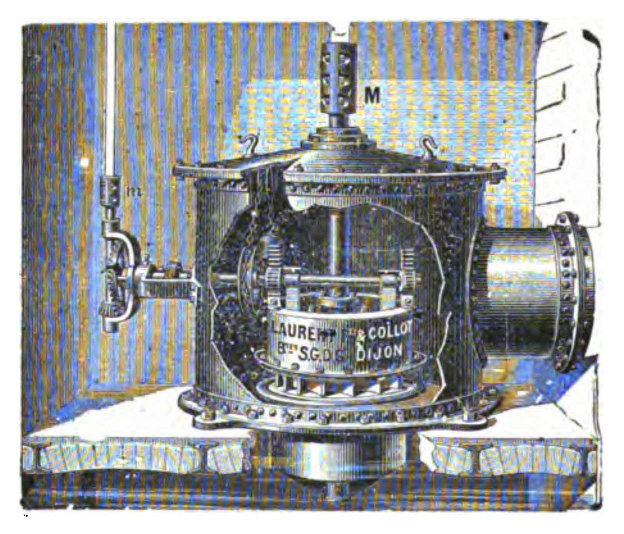


Fig. 23. — Turbine « normale » de Laurent et Collot.

Les aubes des turbines Gandillon sont en acier forgé, taillées en lames de couteau, et peuvent être redressées en cas de besoin ou même changées, ce qui rend presque indéfinie la durée de ces moteurs.

Ces turbines (fig. 24) marchant à grande vitesse, conviennent particulièrement pour la commande des dynamos-électriques, qu'elles peuvent souvent actionner avec un seul engrenage. Elles s'installent pour marcher toujours noyées et leur pivot ne supporte qu'une très faible pression ce qui en réduit l'usure au minimum, bien qu'il n'exige aucun graissage.

Pour les chutes de 5 mètres et au-dessus, on emploie une

huche en tôle et cornières dans laquelle l'eau est amenée par des tuyaux en fonte ou en tôle.

M. Gandillon a également étudié, en collaboration avec M. Vigreux professeur à l'École Centrale, un servo-modérateur très remarquable et qui est représenté sur la figure.

Ce servo-modérateur est placé sous la dépendance d'un régulateur à boules dont le mouvement commande le dispositif d'asservissement.

Les turbines à axe horizontal pour hautes chutes construites

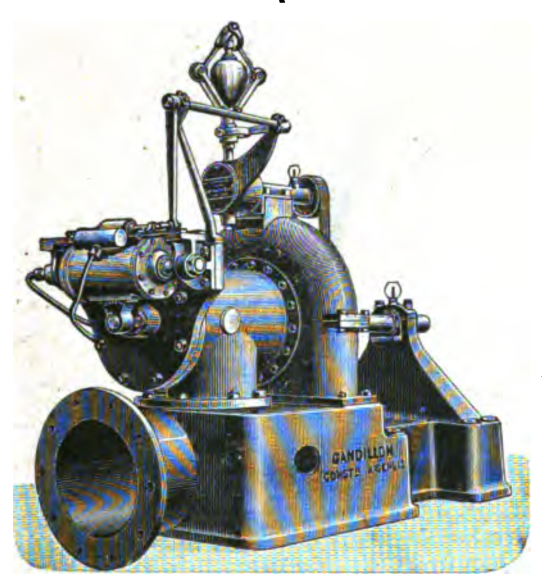


Fig. 24. — Turbine de M. Gandillon avec servo-modérateur Vigreux.

par M. Gandillon présentent des avantages particuliers. Elles ont été spécialement établies pour actionner des machines dynamos-électriques, leur vitesse de rotation est, à dépense d'eau égale, bien plus grande que celle des turbines simples et l'eau est injectée, dans leurs couronnes mobiles, par deux séries d'orifices, diamétralement opposés, dont la symétrie est parfaite; par conséquent, l'usure et l'entretien sont presque nuls. Leur arbre se prolonge en dehors du bâti de la turbine, et peut recevoir un manchon, de façon à former, avec les machines dynamos, un ensemble électrogène compact et puissant.

Elles peuvent être munies d'une poulie, pour actionner, par

courroie, des machines quelconques et dans ce cas, être construites sans le servo-modérateur de vitesse, si ces machines n'exigent pas la régularité de marche qui est nécessaire pour les dynamos-électriques.

Moteurs hydrauliques et régulateurs de Neyret-Brenier et Cie. — Nous avons dit, qu'au point de vue du mode

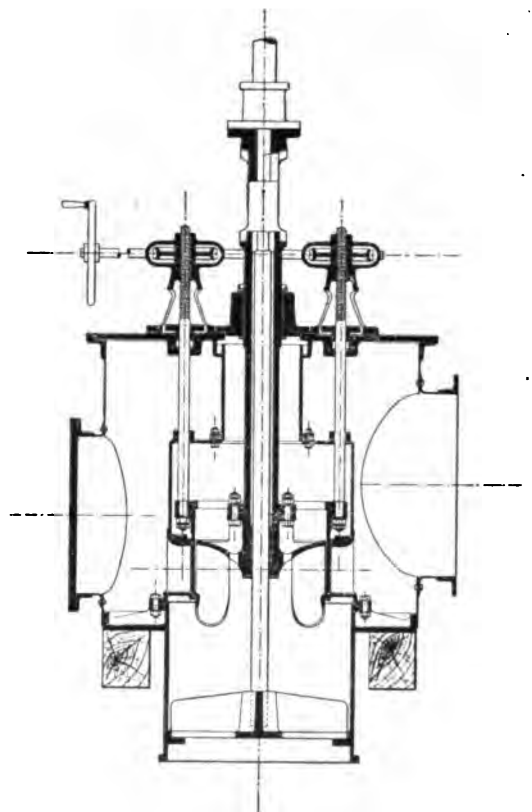


Fig. 25 — Turbine centripète, avec bache, de Neyret-Brenier (coupe).

d'action de l'eau, on distingue deux classes de turbines : celles dites à *libre déviation* et celles dites *à réaction*. Dans les premières, l'eau sort du distributeur avec toute la vitesse que peut lui donner la chute; dans les autres, au contraire, elle en sort avec une vitesse réduite.

On peut encore dire que, dans le cas de la libre déviation l'eau agit sur la roue mobile par sa vitesse : c'est la forme cinétique

de l'énergie ; tandis que dans le cas de la réaction, elle agit à la fois par sa vitesse et par sa pression : cette seconde action est due à l'énergie potentielle.

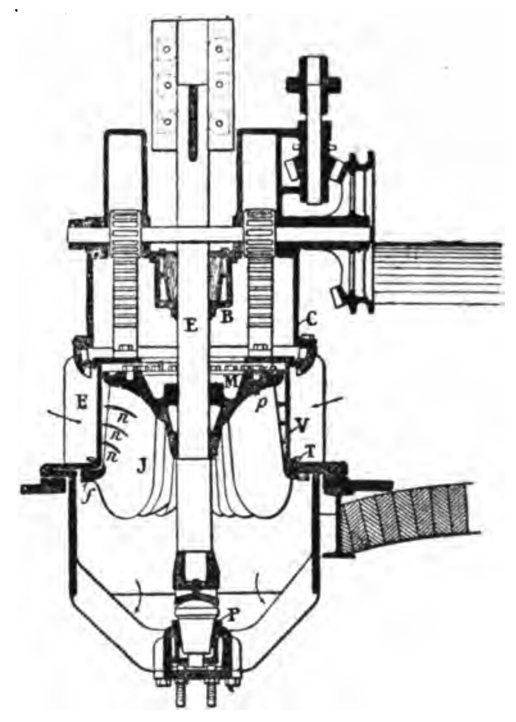


Fig. 26. — Coupe d'une turbine centripète ou mixte de Neyret-Brenier.

Dans chacune de ces deux classes, nous trouvons deux genres : turbines à arbre vertical et turbines à arbre horizontal ; enfin, chaque genre comporte trois types :

1° *Turbine parallèle ou axiale.* — Les molécules d'eau traversent la roue mobile en se déplaçant sur une surface cylindrique circulaire ayant pour axe, l'axe de rotation.

2° *Turbine radiale centrifuge.* — Les molécules d'eau traversent la roue mobile en se mouvant dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, en s'éloignant de cet axe.

3° *Turbine radiale centripète.* — Les molécules d'eau se meuvent encore dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, mais en s'en rapprochant.

Enfin, on considère parfois le type mixte dérivant de la turbine

axiale et de la turbine radiale; on ne l'a exécuté qu'en *centripète parallèle* et souvent on l'appelle simplement, mais vicieusement *centripète.*

Le point important dans la construction des turbines, comme dans celle de toutes les machines, est d'obtenir le meilleur rendement possible.

Nous avons dit que le rendement des turbines varie de 75 0/0 à 85 0/0 suivant le type. Pour atteindre ces rendements élevés, il faut d'abord une fabrication très soignée, bien entendu, mais il faut, surtout, que la machine soit étudiée tout spécialement pour la chute à laquelle elle est destinée.

La maison Neyret-Brenier et C[ie] n'a cessé, depuis cinquante ans, de perfectionner ses procédés de fabrication, modifiant peu à peu sa construction, suivant les indications fournies par une longue pratique. Elle a, de plus, créé dans ses bureaux un service spécial d'ingénieurs chargés des essais et des recherches. Elle est en mesure d'offrir à ses clients des turbines étudiées et construites avec le plus grand soin, et pouvant répondre à toutes les exigences, tant au sujet du bon rendement qu'à celui de la robustesse. La région des Alpes, le « Pays de la houille blanche », comme on l'appelle maintenant, lui a offert un vaste champ d'expériences, où elle a eu à étudier des turbines de tous les types, placées sous des chutes variant de 1 mètre à 1.000 mètres.

Parmi les modèles les plus intéressants créés et construits par ces ateliers à juste titre renommés nous citerons les suivants :



Fig. 27. — Roue cloisonnée pour turbine Fourneyron.

Turbine centripète mixte. — Dans ce type, la couronne mobile J (fig. 26) à aubes en cuillères, est placée dans une enveloppe en spirale C, dont l'alimentation s'effectue par la tubulure T. L'évacuation de l'eau se produit par le coude A qui est prolongé par un tuyau plongeant dans l'eau d'aval.

Le réglage du débit est effectué par la vanne circulaire qui agit simultanément sur tous les orifices directeurs. La manœuvre de cette vanne s'opère par un volant, actionnant par vis sans fin et

roues hélicoïdales, deux tiges de traction filetées dans le moyeu de roues hélicoïdales, auxquelles est attachée la vanne.

L'enveloppe C est fondue en deux parties réunies à boulons. L'arbre horizontal est supporté dans deux paliers venus de fonderie, l'un P, avec le fond C′ de l'enveloppe, l'autre P′ avec le coude A de sortie de l'eau de la turbine. Ce dernier est en même temps un palier de butée destiné à contre-balancer les efforts horizontaux dus à l'action de l'eau sur les aubes.

Des regards autoclaves B, disposés en plusieurs endroits de l'enveloppe permettent d'accéder facilement au vannage ainsi qu'aux couronnes mobile et fixe.

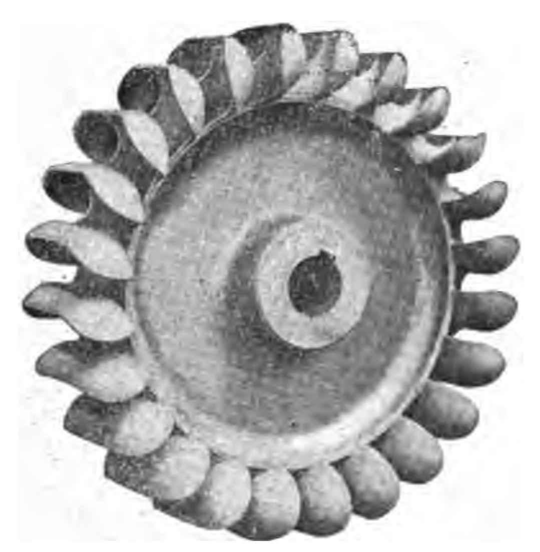


Fig. 28. — Roue à aubes d'une turbine centripète à admission partielle de Neyret et Brenier de Grenoble.

Dans le but d'éviter ce que l'on appelle l'*obstruction partielle des ouvertures* dans la turbine Fourneyron et qui cause une diminution de rendement, il est utile de cloisonner les roues de ce genre de turbines quand on emploie un vannage par tiroir cylindrique. C'est là une grosse difficulté de construction, mais que la maison Neyret-Brenier est cependant parvenue à surmonter. La figure 27 représente une roue cloisonnée pour turbine mixte.

Dans le type de turbine centripète, à réaction et à arbre horizontal, le distributeur est entouré d'une huche dont la section est

constammont proportionnelle au débit qui doit la traverser. De cette façon, la vitesse de l'eau est constante, et on n'a dans la huche ni remous ni perte de charge autre que celle due au frottement.

Turbine centripète à admission partielle. — Cette turbine ressemble, à première vue, à la roue Pelton, mais son fonctionnement n'est nullement le même : les aubes sont incurvées comme dans toutes les turbines radiales et l'eau suit franchement leur

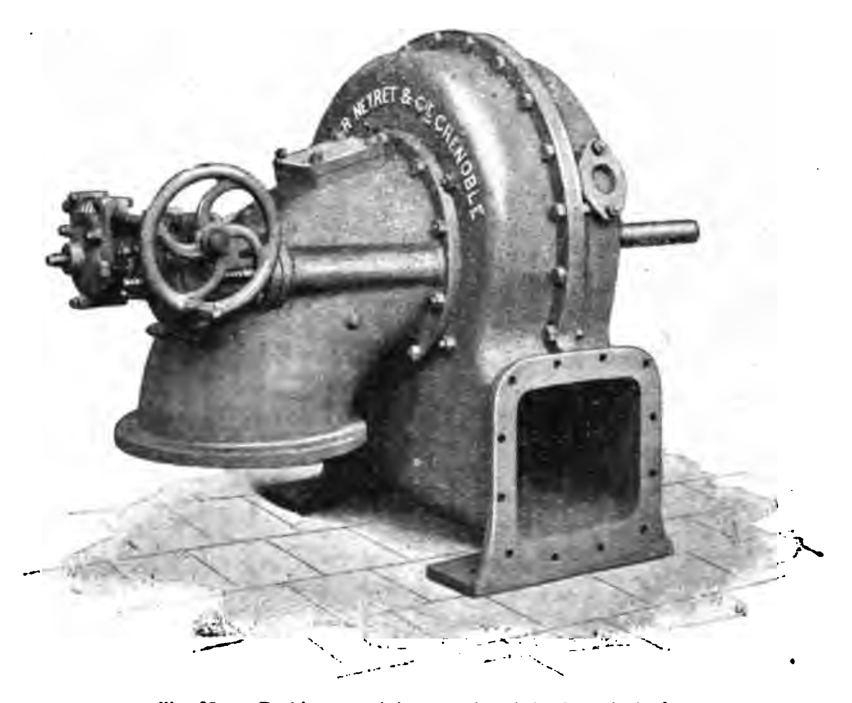


Fig. 29. — Turbine centripète ou mixte à huche spiraloïde.

surface en allant de la périphérie vers le centre. Le distributeur est formé de buses à languettes. Ce type est employé couramment et la figure 28 représente une roue à aubes appartenant à ce genre de turbine à haut rendement très convenable pour les hautes chutes.

Turbine centripète double, à huche spiraloïde. — Cette turbine est formée de deux turbines simples dont les roues mobiles et les distributeurs sont accolés. Cette distribution permet d'avoir

une grande puissance, tout en conservant une grande vitesse. Il y a deux tiroirs de vannage qui s'ouvrent et se ferment en même temps de la même quantité ; on équilibre ainsi les poussées dans le sens de l'axe. Lorsqu'on veut obtenir, sous une chute relative-

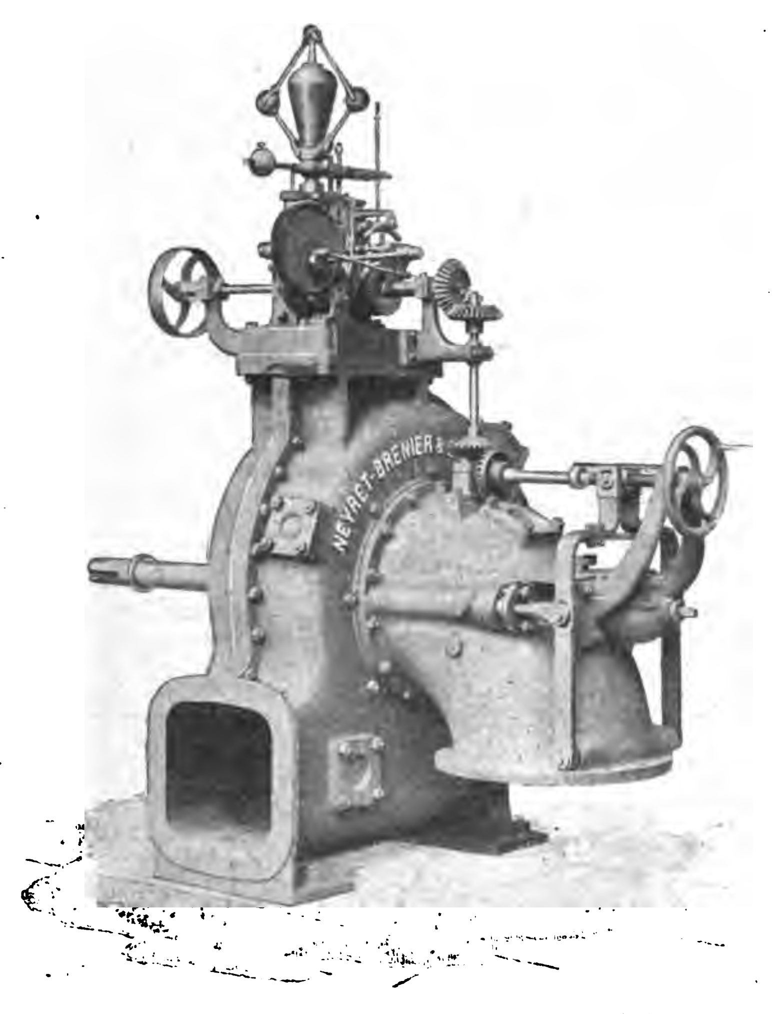


Fig. 30. — Turbine hélico-centripète pourvue du système de régulateur à pompe à huile, de Neyret-Brenier et Cie de Grenoble.

ment faible et à gros débit, une turbine puissante et à grande vitesse, on monte sur le même arbre un plus grand nombre de

roues et on obtient de la sorte des turbines dites multiples.

Il faut remarquer ici que la turbine double peut être montée avec un seul tube de succion pour les deux roues qui sont alors deux roues simples dégorgeant dans les deux branches d'un T dont le tube de succion forme le pied.

Turbine centripète à huche spiraloïde à directrices mobiles. — Les cloisons du distributeur sont toutes mobiles, chacune autour d'un axe propre. On peut les faire tourner toutes ensemble du même angle, et par suite faire varier l'espace qu'elles laissent entre elles, c'est-à-dire la section du distributeur.

Ce vannage conserve mieux le rendement que le tiroir cylindrique, mais est moins robuste que celui-ci lorsqu'on a affaire à des eaux charriant des sables durs.

Il se prête mieux qu'un tiroir à l'action rapide d'un régulateur et peut s'adapter aux turbines multiples sans aucune difficulté, comme dans le modèle centripète quadruple à directrices mobiles et à chambre ouverte.

Nous devons encore signaler en terminant cette trop courte revue des modèles de la maison Neyret-Brenier, les divers types de régulateurs de vitesse, notamment les *régulateurs-absorbeurs* maintenant constante la vitesse de rotation des turbines, quelles que soient les variations de la charge, les *vannes-compensatrices* et tout le matériel accessoire nécessaire pour les installations de force motrice hydraulique.

Turbines « America », de Sloan et Cie. — En consultant, pour la rédaction du présent ouvrage, les catalogues des différents constructeurs de turbines français ou suisses, j'ai été frappé de ce fait que beaucoup d'entre eux annoncent des rendements merveilleux, qu'ils vont jusqu'à garantir. Je dois dire, en passant, la vérité à ce sujet.

Les constructeurs qui offrent si libéralement des garanties de rendement de leurs modèles de turbines à leurs clients spéculent sans doute sur la crédulité de ceux-ci et l'improbabilité de leur voir exiger des essais précis. La preuve de la garantie est en effet rarement exigée par l'acheteur, et, du reste, l'établissement de cette preuve est entourée de tant de difficultés et son résultat

est si aléatoire que, si le client veut y recourir, il est bien rare que le constructeur ne trouve pas à s'échapper *par la tangente*, suivant l'expression consacrée. Pour des essais réellement sérieux, il est de toute nécessité de disposer d'une installation qui permette de mesurer d'une façon rigoureuse l'eau employée à chaque degré d'admission, et cela n'existe pour ainsi dire jamais. Les ingénieurs appliquent alors des formules et des coefficients plus ou moins élastiques, comme on a pu le voir plus haut dans l'étude, d'ailleurs très remarquable à tous points de vue, de MM. Prasil et Rateau, et on arrive à cette chose plaisante à lire qu'une turbine a rendu, dans des essais très officiels, 90 et demi pour cent, par exemple.

En pareille matière, le calcul est insuffisant et l'application de formules toutes faites trop sujette à caution pour qu'on puisse accorder la moindre créance au résultat qu'elles indiquent. C'est en de semblables circonstances qu'on peut affirmer, non sans raison, que l'on fait dire tout ce que l'on veut aux chiffres en les manipulant habilement. Mais, en réalité, le rendement spécifique d'une turbine ne peut être exactement déterminé qu'à la condition expresse, absolue, de connaître la quantité d'eau débitée par seconde à divers degrés d'admission. Or, aucune station d'essais de turbines, munie de réservoirs jaugés, n'existe encore en Europe, — espérons cependant que, grâce aux efforts persévérants et éclairés de certains ingénieurs cette lacune ne tardera pas à être comblée, — et il faut aller en Amérique pour trouver une installation scientifiquement outillée pour ce genre de mesures, la *Holyoke Testing Flume*, qui délivre, à toute personne en faisant la demande et envoyant une turbine à essayer, un certificat officiel constatant que cette turbine est réellement susceptible de développer, sous une hauteur de chute et avec un débit déterminé par seconde, une certaine quantité de travail, c'est-à-dire de fournir un rendement mécanique donné. Et, il faut le répéter encore, cette station est actuellement la seule existante au monde, et la seule pouvant donner des chiffres véritablement certains relativement au rendement des turbines. Le corollaire c'est que toutes les affirmations d'industriels dont les modèles n'ont pas été soumis à ce contrôle sont purement fantaisistes, et d'ailleurs les intéressés eux-mêmes le savent mieux que personne et la créance qu'il faut apporter aux formules d'après lesquelles ils déduisent

les rendements. C'est une pure fumisterie contre laquelle on ne serait trop mettre en garde les acheteurs crédules ou insuffisamment renseignés.

Les turbines « America » de la maison Sloan et Cie sont les seules dont les rendements sont exactement déterminés par les essais faits à la *Holyoke Testing Flume*. Elles sont de la création de John Mac-Cormick, l'inventeur célèbre des turbines connues en France sous le nom de « turbine-Hercule » et « turbine Victor » et reproduites sous ce nom ou d'autres analogues par divers fondeurs et mécaniciens, mais, à la suite de longues expériences et nombreuses années de pratique, les derniers types créés de ce système, sont, de l'avis général en Amérique, incontestablement très supérieurs à tous les systèmes concurrents qui imitent la Mac-Cormick, cela plus ou moins maladroitement et sans trop savoir le pourquoi des modifications apportées. Il n'en est pas autrement d'ailleurs en Europe, où les constructeurs copient le même modèle, tout en demeurant, pour la plupart, bien incapables d'expliquer la raison d'être de telle ou telle disposition donnée aux aubages, disposition en réalité empirique et résultant de multiples tâtonnements permettant de choisir la forme la plus favorable.

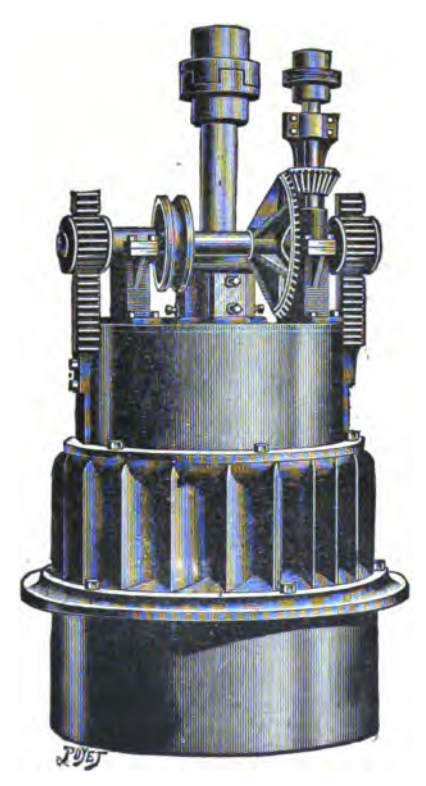


Fig. 31. — Turbine « America » MC pour hautes chutes.

Les turbines *America* sont donc très en avance sur tous les types similaires, grâce à la longue pratique de leur constructeur. Elles sont construites pour débits variables et grandes forces ; leur vitesse de rotation est très considérable, ce qui facilite leur accouplement à beaucoup

de machines; enfin elles sont construites pour tourner soit à droite, soit à gauche, suivant l'usage ou la commodité. La roue mobile est d'une seule pièce, les aubages sont en fonte, acier et bronze ; le tout est d'une rigidité absolue et se trouve à l'abri de toute dislocation. Le vannage consiste en un rideau mû verticalement par deux crémaillères intérieures ou extérieures suivant le cas et qui, dans leur mouvement ascensionnel découvrent tout

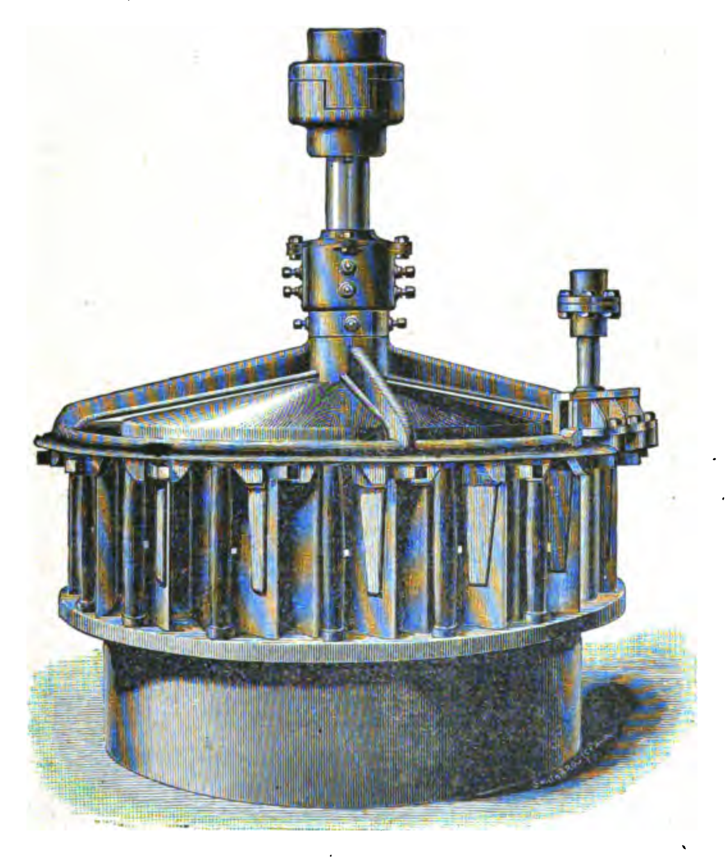


Fig. 32. — Turbine « America » Modèle N. S. pour basses chutes.

autour de la turbine une section annulaire des aubages de la roue mobile proportionnelle à la quantité d'eau que l'on veut employer ; ce moyen de distribution d'eau, d'une grande simplicité est absolument parfait. La roue est enfermée dans une caisse en fonte portant les directrices fixes qui injectent l'eau sous un angle con-

venablement calculé dans la partie des aubages qui est découverte par le vannage dont il vient d'être parlé. Le pivot de support est en bois dur, de forme convexe, et c'est sur ce pivot que repose le sabot en fonte de forme concave qui supporte la turbine. Comme ce pivot est toujours dans l'eau, sa lubrification est toujours assurée.

Les turbines « America » sont d'une extrême simplicité et d'une robustesse à toute épreuve. Elles se font à axe horizontal ou à axe vertical et pour toutes puissances. On peut affirmer que c'est le modèle le plus pratique et le plus perfectionné qui existe actuellement ; aussi son rendement mécanique — prouvé par des certificats de la station d'Holyoke, — n'est jamais inférieur à 80 p. 100, et atteint jusqu'à 86 et 88 p. 100. Ces chiffres se passent de tous commentaires et montrent mieux que tout ce qu'on pourrait ajouter, la valeur de ce type si supérieur à tout ce qui existe actuellement.

Si le dispositif de turbine « America » que nous venons de décrire est réellement très avantageux dans les circonstances où l'on dispose d'eau sous pression assez forte, le type « N. S. » de Sloan et Cie est incomparable pour les basses chutes, à cause de son peu de hauteur qui permet de noyer le boitard supérieur sous le niveau d'amont, ce qui évite des pertes de rendement par introduction d'air dans la turbine.

Cette turbine, qui est du célèbre hydraulicien Mac Cormick, a été étudiée spécialement pour les basses chutes; mais nous devons ajouter que là n'est pas la seule raison de son énorme succès. Il a été reconnu, par des essais successifs faits à Holyoke, que le vannage à directrices mobiles est supérieur au vannage à directrices fixes pour les débits variables; aussi, en Amérique, il y a une tendance générale à substituer le vannage à directrices mobiles au vannage à rideau.

Certains constructeurs européens ont imaginé depuis longtemps déjà de rendre amovibles les aubages de leurs modèles, dans le but de pouvoir remplacer le cas échéant une aube détériorée ou rompue. Les ingénieurs compétents n'ont pas tardé à faire justice de cette raison fallacieuse car ils savent qu'après un certain temps de marche, l'oxydation rend absolument impossible le démontage des aubes.

D'autres ont cru opportun de changer la forme et les propor-

tions des pivots en gaïac; il en est résulté des ennuis graves, qui expliquent la prévention que l'on rencontre, dans certaines régions, contre les pivots en bois. Cette prévention n'est pas justifiée. Certains ont changé la forme, le nombre et l'inclinaison des aubages; ces changements sont certainement néfastes, car les essais que l'on fait chaque jour à Holyoke prouvent que la moindre modification dans les aubages change profondément les rendements et la vitesse de régime des turbines. Que donnent donc, en réalité, ces modèles modifiés un peu au petit bonheur?... La vérité est que personne ne saurait l'affirmer et étager son affirmation sur des preuves sérieuses, puisqu'il n'existe pas encore dans nos pays de station d'essais pour turbines.

Des procès-verbaux officiels d'Holyoke relatifs aux essais d'une turbine spécialement étudiée pour obtenir une grande vitesse et de grands rendements à admission partielle. Pour obtenir ce résultat, le constructeur n'a pas hésité à sacrifier un peu le rendement à pleine admission.

Les résultats obtenus à admission partielle sont merveilleux, et personne n'est parvenu à atteindre en marche courante :

84.8 0/0 à 3/4 de débit;
82.1 0/0 à 3/5 de débit;
75.5 0/0 à 1/2 de débit.

De tels chiffres peuvent se passer de commentaires.

Pivots. — La prévention que certains industriels ont contre les pivots en gaïac à causé une certaine vogue en faveur du pivot genre Fontaine aujourd'hui dans le domaine public et construit par la plupart des constructeurs français.

Ce pivot, qui a été créé pour les turbines à libre déviation système Fontaine, ne présente pas d'inconvénient pour ce genre de turbine, mais c'est une faute grave que de vouloir l'installer sur des turbines à réaction genre Mac Cormick.

En effet, il nécessite un arbre creux énorme qui oblige de changer les sections et la forme des aubages au grand détriment du rendement, l'expérience l'a simplement démontré et c'est pourquoi MM. Sloan et Cie ne l'emploient pas, ayant la preuve depuis vingt ans qu'avec la forme d'aubage de leurs turbines le pivot en gaïac ne donne aucun mécompte et est, au contraire, de très longue du-

rée. Dans certains cas ils recommandent l'usage du pivot de sûreté fonctionnant hors de l'eau et ne nécessitant pas d'arbre creux, il est placé hors de l'eau, il fonctionne dans l'huile ; ce qui le rend tout à fait remarquable, c'est que les deux surfaces de frottement qui baignent dans l'huile ne peuvent pas, quoi qu'il arrive, cesser d'être rigoureusement parallèles.

En effet, la partie tournante du pivot est réunie à l'arbre par un joint universel, de telle sorte que si, par faute de montage ou

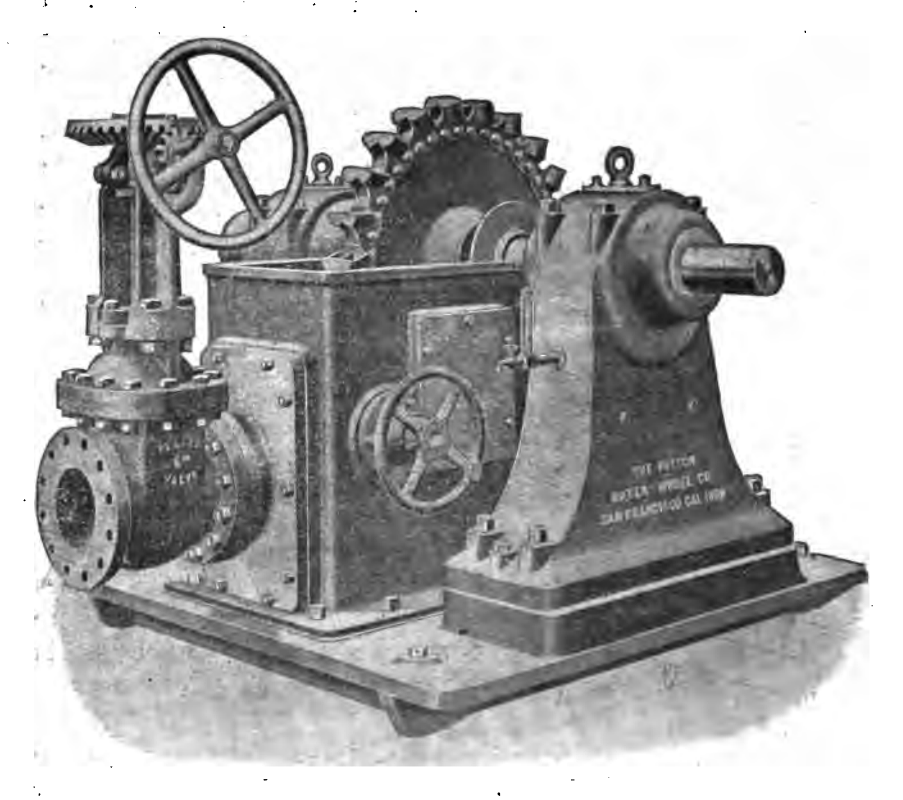


Fig. 33. — Roues Pelton pour hautes chutes. (Sloan et Cie constructeurs)

par suite d'un affaissement quelconque, l'arbre cesse d'être perpendiculaire, les deux faces du pivot n'en restent pas moins rigoureusement parallèles. Ce résultat n'est obtenu par aucun autre pivot.

Le *pivot à billes* se compose d'un joint universel analogue

mais les deux faces en contact sont remplacées par un roulement à billes.

Il est à peine besoin de dire que cette combinaison est le dernier mot de la perfection, et permet de supporter des charges énormes avec la plus entière sécurité. Il a été pratiquement démontré que la charge d'écrasement d'une bille de 20 millimètres est d'environ 20.000 kilogrammes ; or, comme le moindre de nos pivots comporte 15 à 20 billes, on peut admettre en charge de travail un poids considérable avec la plus entière sécurité.

Jusqu'ici on avait peu employé les pivots à billes pour turbines, précisément à cause de la nécessité absolue de maintenir les deux chemins de roulement rigoureusement parallèles, chose pratiquement impossible sans ce joint universel.

Turbines Bouvier. — Les turbines sont, avons-nous dit, des récepteurs hydrauliques tournant, en général, avec une grande vitesse. Ces machines consistent principalement en une couronne mobile avec aubes, qui reçoit l'eau par des canaux répartis sur la circonférence ou sur une partie de la circonférence, dont l'ensemble constitue la couronne fixe appelée le *distributeur*. On les fait tourner sur un axe vertical ou horizontal.

Dans le premier système, l'eau arrive horizontalement sur les aubes de la couronne mobile par l'intérieur et en sort en divergeant, c'est le type *Fourneyron* ; dans le second système, l'eau entre dans la couronne mobile par sa face supérieure et sort par la face inférieure, sans s'éloigner d'une distance constante de l'axe, c'est le type *Euler*.

Sans entrer ici dans la discussion des principes fondamentaux de la construction des turbines (principe qui est analogue à celui des *roues à réaction*), il importe de rappeler que du rapport entre les dimensions des aubes des couronnes mobile et fixe dépendent la dépense et le rendement de ces machines, suivant les variations de la vitesse de la rotation.

Si la vitesse linéaire à la circonférence d'une turbine est à peu près égale à celle de l'eau, la turbine agit alors à grande vitesse. Le choix du rapport, dans ce cas, permet de dépenser un grand volume d'eau avec un appareil d'un diamètre restreint. L'adoption d'une turbine à grande vitesse se motive, soit que l'on dispose d'un fort volume d'eau sous une faible chute (un mètre et même

moins), soit que l'on veuille économiser les ouvrages destinés à le recevoir (fondations, chambre d'eau, etc.), soit enfin que l'on cherche à obtenir effectivement pour l'arbre une vitesse plus grande. Mais le rendement d'une turbine à grande vitesse ne dépasse guère 0,75 du travail brut dépensé.

Si, au contraire, même pour des chutes peu élevées, la vitesse d'entraînement est égale à la moitié environ de celle de l'eau, la turbine est dite à *petite vitesse*, et le rendement peut toujours être supérieur à celui d'une turbine à grande vitesse fonctionnant dans les mêmes conditions de chute et de volume.

Les turbines offrent sur les roues l'avantage d'absorber des volumes considérables d'eau, avec des dimensions bien plus faibles pour le même débit; elles gardent leur effet utile quand leur vitesse s'écarte même sensiblement de la vitesse normale ; enfin, elles jouissent de la propriété précieuse, que n'ont pas les roues, de mettre à profit les plus hautes chutes.

Exécutées en métal, d'une installation facile, d'une longue durée, les turbines, plus économiques que les roues en bois, peuvent donner, ainsi que nous l'avons vu, jusqu'à 88 0/0 de la puissance absolue de la chute comme force utilisable ; mais avec des appareils de construction ordinaire, placés dans des conditions anormales, le rendement peut descendre à 65 et même 50 0/0, et au-dessous.

Au premier rang des constructeurs français qui ont acquis une juste célébrité par l'étude rationnelle et vraiment scientifique de leurs turbines, il faut placer MM. A. et H. Bouvier de Grenoble, dont les modèles sont très remarquables et ont reçu un succès mérité. Les installations réalisées par MM. Bouvier ne se comptent plus, dans la région des Alpes principalement. Citons parmi les plus importants la station centrale électrique d'Engins près de Grenoble faisant le transport de force et l'éclairage de la ville de Voiron avec trois turbines de 500 HP sous 285 mètres de chute. L'usine d'Epierre fabriquant des produits chimiques avec quatre turbines sous 570 mètres de chute. L'usine de Calypso près de Saint-Michel-de-Maurienne possédant deux turbines de 250 HP, deux de 400 HP et deux de 350 HP sous 135 mètres de chute. L'usine de Villelongue dans les Pyrénées possédant trois moteurs de 1250 HP sous 525 mètres de chute. Ces turbines devaient pouvoir résister à l'emballement complet aussi elles sont de con-

struction spéciale en acier avec frettes extérieures. La vitesse différentielle de la jante à l'emballement a été de plus de 100 mètres à la seconde, néanmoins, après les essais, aucune déformation permanente n'a été constatée.

Ces diverses turbines sont pourvues d'un *régulateur de vitesse* à frein hydraulique d'une très grande sensibilité et dont nous devons dire un mot ici.

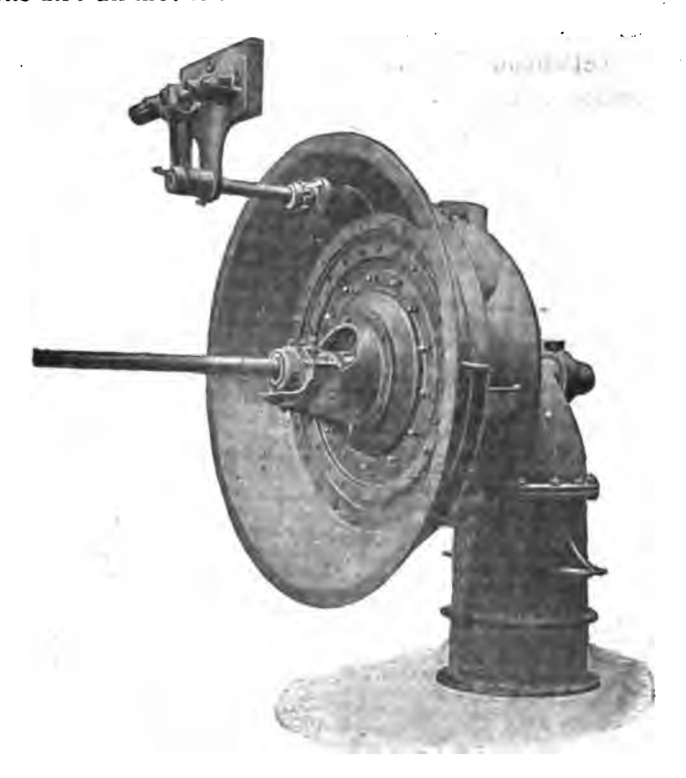


Fig. 34. — Mécanisme d'une turbine « Francis » de Luther de Brunswick.

Le principe de cet appareil est d'absorber instantanément l'énergie qui n'est plus utilisée par les machines réceptrices et de la rendre disponible dès qu'il est nécessaire. Son installation est très simple, il suffit de placer une poulie d'attaque sur la transmission principale de l'atelier dont on veut régulariser la vitesse; son entretien est pour ainsi dire nul, enfin quant à sa force, elle doit être prise égale ou un peu supérieure aux variations brusques maxima qui sont à prévoir.

Son emploi se recommande pour les tissages, moulinages, scieries, papeteries, éclairage électrique, etc., en résumé pour toutes les industries où on a besoin d'une vitesse absolument régulière.

MM. Bouvier ont encore fait connaître un régulateur tachymètre très perfectionné et permettant de supprimer complètement les oscillations des régulateurs avec servo-moteurs ordinaires. On peut régler avec un appareil unique de vannage de toutes les turbines actionnant des alternateurs groupés en parallèle.

Ce système, en raison de sa supériorité, a été choisi pour être appliqué aux six turbines de 1500 HP sous 100 mètres de chute de l'usine de force motrice de Vercors qui produit le courant électrique servant à l'éclairage et à la force motrice de la ville de Vienne (Drôme), ainsi que pour les usines de la Société de la Romanche qui va faire le transport de la force et de la lumière pour la ville de Grenoble avec trois turbines de 2500 HP sous 53 mètres de chute. Ces installations montrent en quelle estime les spécialistes tiennent les appareils construits par MM. Bouvier.

Turbines Luther. — Une importante maison de construction de Brunswick (Allemagne), la firme Luther et Cie s'est créé

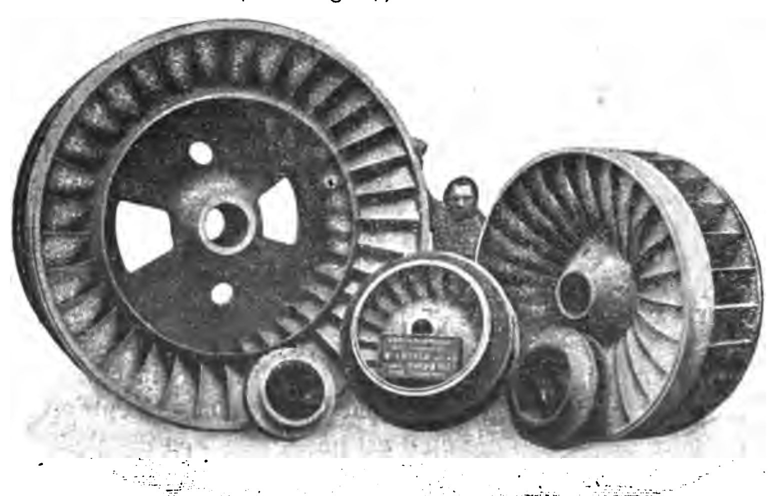


Fig. 35. — Roues mobiles des turbines « Francis », de C. Luther et Cie.

une spécialité de turbines dont nos gravures, fig. 34 et 35 montrent la structure intérieure. Les roues tournantes de ces turbines

comportent deux rangs d'aubes concentriques, disposition qui a pour but d'utiliser au mieux la puissance de l'eau. Il est à remarquer toutefois que ces modèles ne présentent en somme aucune originalité particulière. Ce constructeur s'est borné à copier servilement les dispositions classiques des turbines « Francis » ou « Victor » qui ont acquis une juste renommée aux Etats-Unis.

Nous n'avons aucune donnée sérieuse sur le véritable rendement de ces machines et n'insisterons pas davantage sur leur agencement.

Turbines Royer et Jolly. — Cette maison d'Epinal a acquis une grande renommée, en raison de la construction soignée de ses différents modèles. De nombreux types de turbines sortant de ces ateliers sont en fonctions dans les usines des Vosges et des Alpes, et les industriels qui les utilisent sont satisfaits de leur excellent rendement et de la disposition rationnelle des divers organes, dont la simplicité et la robustesse sont réellement très remarquables, ce qui nous a amené à mentionner ainsi rapidement ces modèles estimés.

Petits moteurs hydrauliques. — Pour certaines applications où il n'est besoin que de quelques kilogrammètres à peine, tels que la commande d'appareils de laboratoire, on a proposé l'usage, dans les cas où l'on dispose de conduites d'eau sous pression de 40 à 50 mètres au moins, comme c'est le cas dans bien des villes, de petites turbines pouvant se greffer sur la canalisation. Nous décrirons à titre d'exemple documentaire, deux systèmes construits dans ce but et qui ont reçu d'assez nombreux emplois.

Le modèle américain connu sous le nom de *Chicagos' top* peut se monter sur le robinet d'une colonne montante ; suivant le débit horaire de ce robinet et la pression de l'eau, le travail mécanique développé est plus ou moins considérable. Avec un débit de 300 litres à l'heure et une hauteur d'eau de 25 mètres, on obtient environ 1 kilogrammètre par seconde; avec 1000 litres et 40 mètres, on a 5 kilogrammètres. Ce système se construit suivant deux grandeurs ; la simplicité de son mécanisme est poussée à l'extrême, aussi est-il très bon marché.

La *turbine Humblot* a été un moment en faveur vers 1880 : le diamètre de la roue tournante n'était que de 6 centimètres et son épaisseur de 1 centimètre. Elle portait à sa circonférence 20 ailet-

tes recourbées à angle droit et rivées à deux disques servant à les mainteuir. L'eau sous pression arrivait par un ajutage; un tiroir manœuvré par une crémaillère démasquait à volonté plus ou moins l'orifice de cet ajutage; le jet d'eau frappait sur les palettes se trouvant dans la direction des rayons, la force centrifuge agissait ensuite sur la partie coudée, et l'eau après avoir produit tout son effet utile s'échappait presque sans vitesse par un large orifice.

Comme dans le système précédent, l'axe de cette turbine était horizontal: il traversait la boîte réceptrice par les deux joues qui formaient coussinets. La mise en action se commandait au moyen d'un levier manœuvré par une pédale, l'arrêt était obtenu presque instantanément, car, en formant le tiroir, le levier fixé sur l'axe de la crémaillère venait frotter sur une poulie calée sur l'axe et constituait ainsi un frein puissant. La vitesse de rotation de ce petit moteur qui pesait à peine 5 kilogrammes pouvait varier de 60 à 1800 tours à la minute, mais son meilleur rendement a été constaté à des vitesses intermédiaires dépendant de la pression dont on disposait et de la charge extérieure.



Fig. 36. — Moteur hydraulique Dufort ou turbine Humblot.

M. Humblot, ingénieur des Postes et Télégraphes, a fait entre autres une intéressante application de cette turbine en réduction aux postes télégraphiques imprimeurs (système Hughes).

Ce moteur dépensait 200 litres d'eau à l'heure sous une pression de 20 mètres, ce qui représente un travail de 1,1 kilogrammètre par seconde. Il remplaçait le poids moteur de 60 kilogrammes actionnant le télégraphe Hughes et dépensait $0^{kgm},44$ par seconde. Le rendement est donc de 40 0/0, rendement peu satisfaisant, en réalité.

En supposant une pression d'eau de 36 mètres et un rendement analogue, il faudrait dépenser 250 litres à l'heure pour produire 1 kilogrammètre par seconde avec ce petit turbo-moteur, force insuffisante pour actionner le moindre outil d'usage domestique: machine à coudre, ventilateur, etc. Le prix de revient de la force

produite serait d'ailleurs prohibitif dans les villes où l'eau coûte 40 centimes le mètre cube comme à Paris Le cheval-heure nécessiterait une dépense de 19 mètres cubes d'eau coûtant 7 fr. 50, et ces deux seuls chiffres suffisent à démontrer l'impraticabilité de l'usage de l'eau comme force motrice — même très faible — à l'intérieur des villes. C'est ce qui explique que la turbine Humblot, pas plus que la toupie hydraulique Taverdon — *Chicagos' top* — n'aient obtenu que peu de succès en raison de leur faible rendement et de leur excessive consommation.

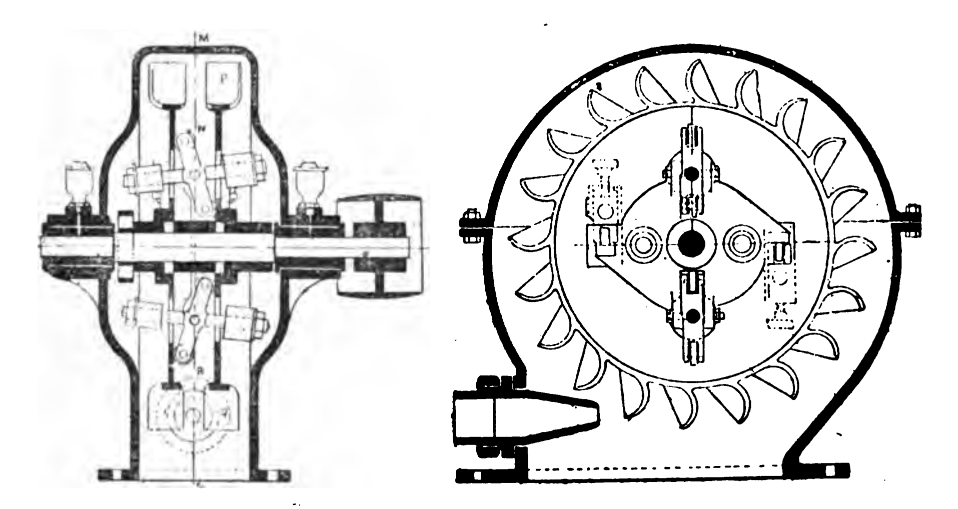


Fig. 37 et 38. — Moteur Cassel (Coupes).

Turbo-moteur hydraulique Cassel. — Ainsi que nous l'avons montré à la fin du chapitre précédent, la question du réglage de la vitesse est de première importance, aussi a-t-elle attiré l'attention des constructeurs, et plusieurs solutions lui ont été données. Dans le moteur Cassel, qui était exposé à l'Annexe de Vincennes en 1900, ce réglage était obtenu automatiquement avec une remarquable précision, et c'est ce qui nous engage à décrire ce système. Cette turbine est du type à injection tangentielle genre roue Pelton, ce qui la recommande tout spécialement pour les hautes chutes. Nos fig. 37 et 38 représentent en coupe un turbomoteur de ce système, muni d'un distributeur à une seule tuyère conique. L'eau sortant de cette tuyère vient frapper les augets

ou palettes. Ces augets font corps avec deux plateaux, non clavetés sur l'arbre afin de pouvoir se déplacer longitudinalement. Les moyeux de ces deux plateaux sont réunis de chaque côté de l'axe par deux ressorts de rappel.

Entre les deux plateaux se trouve, claveté sur un moyeu de forme spéciale qui porte deux petites tables et sur lesquelles roulent les galets lorsqu'un déplacement longitudinal a lieu.

Ce moyeu central porte en outre deux oreilles en haut et en bas supportant alors l'appareil de réglage proprement dit.

Cet appareil de réglage très simple se compose de deux axes portant chacun une équerre à doubles sonnettes. Les deux équerres sont munies chacune de deux poids différentiels et de galets de friction disposés comme l'indique le dessin.

Pour l'entraînement de l'arbre, on a fait venir sur chacun des plateaux, des oreilles qui poussent, au moyen de butées, le moyeu central claveté sur l'arbre

Il faut dire que c'est le seul moteur existant qui renferme en lui-même son propre appareil de réglage automatique.

Les artifices employés jusqu'ici pour le réglage des moteurs à injection tangentielle (genre roue Pelton, par exemple) n'étaient pas directs, étaient souvent séparés du moteur et avaient de graves inconvénients: l'aiguille conique de « Hatt » qui obstruait la tuyère produisait une veine creuse de liquide; l'emploi d'un « opercule plat » occasionnait une contraction de la veine et déviait le jet; le dispositif en « bec de canard » avait le même inconvénient.

Enfin, le dispositif le plus perfectionné jusqu'ici, le réglage par « tuyère rectangulaire », n'évitait pas les coups de bélier communs également aux appareils précédents:

Dans le fonctionnement d'un appareil à un seul jet, la dépense d'eau est la même, quel que soit le travail réclamé au moteur.

Le réglage de la vitesse est obtenu automatiquement et avec une extraordinaire promptitude par le jeu du mécanisme qui vient d'être décrit, et qui paraît supérieur à ce qui existait auparavant. En effet, les appareils employés pour le réglage de cette catégorie de turbo-moteurs hydrauliques étaient distincts de la roue mobile et présentaient, par suite, de sérieux inconvénients. L'aiguille conique de Hatt, utilisée pour obstruer la tuyère, produisait une veine creuse de liquide ; l'emploi d'un opercule plat occasionnait

pour sa part une contraction de la veine et déviait le jet ; le dispositif dit « en bec de canard » présentait le même défaut ; enfin le moyen le plus récent de réglage par tuyère rectangulaire n'évitait pas les *coups de bélier* survenant dans le fonctionnement des précédents dispositifs.

En résumé, le modèle de turbo-moteur Cassel paraît présenter de très réelles qualités et l'on peut s'étonner que son emploi n'ait pas pris plus d'extension car il s'applique aussi bien aux chutes de faible débit mais de grande hauteur qu'aux chutes n'ayant que peu de pression. Dans le premier cas, l'appareil à distributeur unique est préférable, antrement il faut un distributeur à plusieurs jets. Comme dans le type à jet unique, le réglage est obtenu par l'action des poids différentiels, d'une façon absolument indépendante de l'écoulement de l'eau; on est, de ce fait, affranchi des difficultés provenant des modifications à apporter à cet écoulement, et on a tout le temps pour faire varier le nombre de jets en prise avec un dispositif à main ou automatique facile à imaginer.

Comme il existe, encore maintenant, beaucoup de petits torrents, de chutes d'eau qui ne sont pas encore classées, ou sont regardées comme des sources inutilisables de force motrice parce que leur endiguement, leur captage et la régularisation du travail disponible serait trop onéreux pour le résultat obtenu, on peut croire que, dans ces circonstances, le moteur Cassel permettrait d'utiliser ces forces naturelles jusqu'ici perdues, sans qu'il soit indispensable d'édifier des réservoirs d'accumulation toujours coûteux.

Résumé. Avenir des turbo-moteurs hydrauliques. — On cherche de plus en plus, aujourd'hui, à tirer parti des puissances naturelles gratuites qu'on laissait jusqu'à présent se perdre sans profit. Chaque fois que la canalisation d'un torrent ou d'un cours d'eau n'est pas trop onéreuse à exécuter, on s'efforce de capter cette énergie, et cette question, encore à ses débuts, paraît présenter un incontestable intérêt pour les régions où l'eau est abondante.

L'utilisation de la puissance hydraulique depuis quelques années a donné naissance à bien des études de la part des ingénieurs économistes. M. G. Hanotaux, un des premiers, travailla le grave problème économique de l'utilisation des nombreuses chutes d'eaux dont la France est dotée.

D'après une statistique récente, publiée par le ministère du Commerce, la France possède environ 50.000 chutes d'eau, desservant 48.000 établissements et représentant une puissance totale de 575.000 chevaux, fournie en partie par les départements du Puy-de-Dôme, du Finistère, des Basses-Pyrénées, des Côtes-du-Nord, de la Haute-Loire, du Doubs, des Vosges, de la Savoie, de la Haute-Savoie et des Hautes-Pyrénées. Comme puissance, l'Isère arrive en tête avec 37.000 chevaux, puis la Savoie, avec 31.000 chevaux, puis les Basses-Pyrénées, la Haute-Savoie, et enfin, les Hautes-Pyrénées, avec 20.000 chevaux chacun, enfin les Vosges, avec 13.000 chevaux et le Doubs 11.006.

Il y a loin sans doute de la puissance développée par la houille noire qui atteint environ 7 millions de chevaux, à nos forces hydrauliques dont l'application est de date récente, mais dont les admirables réserves donnent de la latitude pour l'avenir.

Dans une remarquable étude, M. Bergès, l'homme le mieux documenté du monde sur ce sujet, estime que toute la région alpine française, allant du Mont-Blanc aux Basses-Alpes, renferme une force totale et utilisable d'au moins 5 millions de chevaux. Une force égale peut être obtenue par le Nord des Alpes, le Jura, les Vosges, les Pyrénées et le massif Central, ce qui nous donne une force totale de 10 millions de chevaux; il est bien évident que, pour obtenir ce chiffre, il faut non seulement se servir des chutes naturelles, mais capter tout cours d'eau au moyen de barrages.

Dans plusieurs de nos précédents ouvrages ([1]) nous faisions mention de différentes installations tant en Suisse qu'en Italie, mais ces installations, quoique très nombreuses, sont loin d'atteindre la force maxima dont on peut disposer.

En Suisse, on estime à 600.000 chevaux la force hydraulique qui peut pratiquement être mise en valeur dans la région. Sur ce chiffre, 200.000 chevaux sont dès à présent employés.

En Italie, sur une force estimée à 2 millions et demi de chevaux, 300.000 sont utilisés.

Quant au prix de revient de l'éclairage fourni par les puissances hydrauliques, il est assez difficile à fixer, tant sont variables les

1. Voir la *Petite Encyclopédie Electro-Mécanique*, vol. IX; les *Moteurs Légers*; l'*Ouvrier Electricien* (2me édition); l'*Ingénieur-Electricien*; *Le Jeune Electricien-Amateur*, etc.

circonstances locales qui influent sur les dépenses d'installation et d'entretien des usines.

Néanmoins, avec ces forces naturelles, on pourrait distribuer l'énergie sur une région assez étendue avec une économie réelle; plusieurs projets ont du reste été établis à ce sujet, et on peut affirmer, pour conclure, que la question de l'utilisation de la « houille blanche », encore à son aurore, est susceptible de prendre un très grand développement, duquel dépend, comme on le conçoit, l'avenir même du turbo-moteur hydraulique que nous venons d'étudier en détail dans les pages qui précèdent.

CHAPITRE V

Les machines à vapeur rotatives

Ainsi que nous le disions au début du présent ouvrage il n'est peut-être pas, en mécanique appliquée, un point qui ait été aussi fouillé, un problème aussi retourné sous toutes ses faces, que celui du moteur à rotation directe.

Le résultat à atteindre est, en effet, séduisant : obtenir sans artifices de cinématique, sans transformation de mouvement, sans pièces intermédiaires soumises à des balancements et à des efforts contraires continuels, le mouvement circulaire continu qui est le plus employé dans les machines industrielles de toute espèce. Et cependant, malgré ces recherches patientes, ces expériences réitérées, ces combinaisons ingénieuses d'organes, la véritable solution, le vrai moteur rotatif n'a pas encore vu le jour, et le piston à mouvement alternatif n'a pas été détrôné par le tambour, le disque ou l'ailette à mouvement circulaire continu.

La chose primordiale en matière de moteurs, le facteur qui décide du succès ou du rejet d'un système nouveau est plus que jamais l'économie, et c'est ce qui explique le développement subit et considérable pris tout d'un coup par les usines hydrauliques utilisant une force qui ne coûte que la peine de la capter : le poids de l'eau courante. C'est cette même raison d'économie qui justifie la concurrence de plus en plus âpre que les moteurs à gaz pauvres font à la machine à vapeur qui exige des combustibles de choix et plus coûteux, et c'est parce que, jusqu'à présent, la consommation de vapeur, à travail développé égal, a été supérieure avec les machines rotatives qu'avec les machines à pistons, que ces machines, malgré leur simplicité d'organes, n'ont pu s'implanter dans la pratique courante.

Il y a une très grande différence, hâtons-nous de le dire, entre ce que l'on est convenu d'appeler les *machines rotatives* proprement dites et les *turbo-moteurs*. Ces deux catégories de machines se séparent l'une de l'autre par leur principe même : dans les premières, la vapeur agit par sa force élastique, en poussant devant elle une cloison qui agit exactement comme un piston à l'intérieur d'un cylindre ; dans les autres, on n'utilise que la force vive de la vapeur, préalablement détendue dans une enceinte spéciale avant d'agir par sa vitesse sur les aubes de la couronne. Or, tandis que ce dernier principe, convenablement appliqué a donné des résultats assez satisfaisants pour permettre à la turbine à vapeur de lutter sur le terrain de l'économie avec le moteur à vapeur à marche lente ou rapide (Corliss ou Westinghouse), à détente, la machine rotative, quelque forme que les inventeurs se soient efforcés de lui donner, est demeurée une ogresse dont la consommation est réellement effrayante, ce qui constitue un vice capital qui a constamment empêché son emploi industriel.

La première idée de la machine rotative à vapeur, c'est-à-dire du moteur à piston tournant de manière à produire directement un mouvement circulaire continu, paraît avoir été émise vers 1855 par le mécanicien français Pecqueur, et dès cette époque, de nombreux modèles basés sur ce principe furent proposés par divers constructeurs persuadés qu'il y avait là une mine nouvelle à exploiter. Citons entre autres MM. Péron et Galy-Cazalat en France, Bisschop, Rennie et Gray en Angleterre, dont les machines eurent un médiocre succès de curiosité, mais non une application pratique, en raison des défauts capitaux qu'elles présentaient, et dont le moindre était une usure exagérée de la pièce tournante, résultant de son frottement continu sur les parois de la boîte à vapeur.

Pour donner un aperçu de la disposition de ce genre de machines, nous donnerons ici la description de quelques systèmes qui ont vu le jour de l'année 1860 à 1880, de manière à ce que l'on puisse se rendre compte de leur fonctionnement, tel qu'il avait été déterminé par les constructeurs.

Machine Uhler. — Sur l'arbre de couche de cette machine était claveté un tambour de forme circulaire monté excentriquement sur cet arbre et jouant le rôle de piston. Le seul point de sa

circonférence par où ce tambour touche le bord intérieur de la boîte à vapeur est percé d'une lumière par où débouche la conduite d'échappement, A chaque révolution de ce tambour, la soupape mobile servant à l'admission est soulevée ; une certaine quantité de vapeur entre, en raison de son expansibilité, agit à pleine pression pendant la moitié de la révolution du tambour,

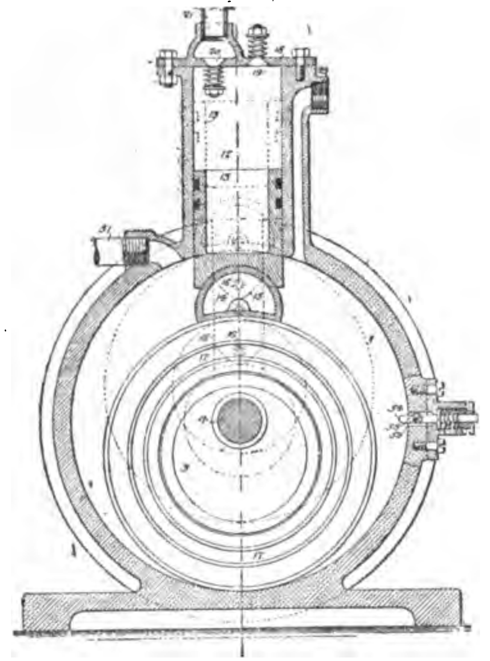


Fig. 39. — Coupe du moteur Uhler.

puis la soupape se referme et la vapeur introduite achève de travailler en se détendant jusqu'à la fin de la course. Celle-ci achevée, la lumière d'échappement est démasquée et la vapeur s'échappe à l'extérieur. Immédiatement après, la soupape d'admission se relève, une nouvelle quantité de vapeur est admise dans la boîte, et le mouvement se continue par la répétition des mêmes phases.

Moteur Braconier. — Ce dispositif ne présente, avec le précédent, que des différences dans la disposition de certains organes. La partie mobile est également un tambour cylindrique E (fig. 40),

dans lequel se déplace un disque D, monté sur une manivelle BC, de façon que le centre B décrive une circonférence autour de l'arbre moteur C, tandis que l'entaille du disque s'incline en glissant le long du coulisseau G qui oscille sur l'axe fixe *a*. L'arrivée de vapeur a lieu par l'orifice O; l'échappement par l'orifice F. Lorsque le disque D se déplace de droite à gauche, le coulisseau ouvre l'orifice d'admission et, quand le point B, ayant fait demi-

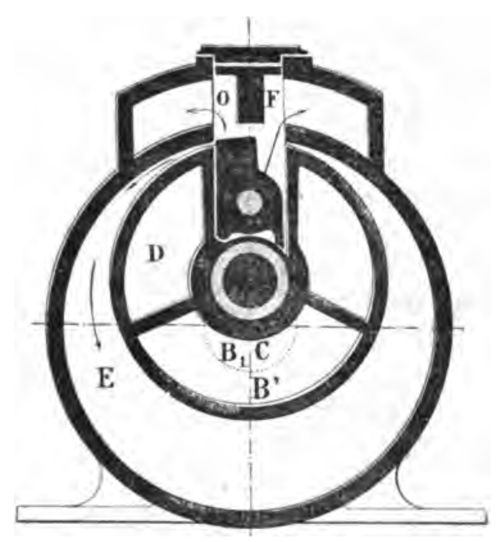


Fig. 40. — Machine rotative Braconier.

tour est arrivé en B′, le coulisseau est revenu à son point de départ et l'orifice d'admission est fermé; enfin le mouvement se continuant, l'orifice s'ouvre de plus en plus. La pièce F ajustée sur le coulisseau intercepte toute communication entre l'arrivée de vapeur et l'échappement. Afin d'obtenir une plus grande régularité d'allure, on a monté sur le même arbre deux disques calés à 180°, de manière à équilibrer les poussées et régulariser la vitesse de rotation. Le moteur Braconier a été utilisé pour actionner des perforatrices dans des travaux de mines; il fonctionnait alors avec de l'air comprimé au lieu et place de la vapeur dont l'usage dans un lieu souterrain est impossible.

Machine Brown. — Dans ce système, construit en Angle-

terre, le cylindre contient un piston, non plus cylindrique mais elliptique, monté excentriquement sur l'arbre, et dont la section mesurée perpendiculairement à l'axe, est égale à la moitié environ de la boîte à vapeur qui le contient : ce rapport est également celui des volumes. Le piston frotte tangentiellement à l'intérieur de la boîte à vapeur de section cylindrique, et une garniture de chanvre assure l'étanchéité sur trois de ses faces. Les distributeurs oscillants admettent la vapeur entre le cylindre, le piston et chacune des palettes oscillantes. L'échappement s'opère par des canaux qui se présentent alors en face des orifices. Ces conduits existent sur tout le pourtour de la machine ; le premier contient de la vapeur arrivant de la chaudière, le second sert à l'échappement, disposition des plus défectueuses en raison des échanges de chaleur qui se produisent forcément à travers la paroi commune.

Des essais faits sur un moteur neuf de 18 à 20 chevaux auraient donné une consommation de 17 kilogrammes de vapeur par cheval-heure. Les tiroirs sont conduits par un excentrique qui donne la

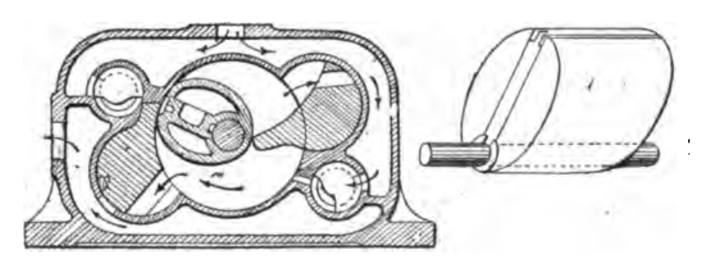


Fig. 41. — Machine rotative Brown. Fig. 42. — Piston.

possibilité d'obtenir le degré de détente voulu. Mais malgré cela, le chiffre de 17 kilogrammes paraît bien faible pour une semblable machine, dont l'usure doit être, de plus, assez rapide, puisqu'à l'allure normale de 600 tours à la minute, la vitesse de frottement du piston sur la paroi intérieure du cylindre, est de 10 mètres par seconde.

Moteur Bambel. — Nos figures 43 et 44 montrent l'aspect du mécanisme intérieur de cette machine dont l'organe principal, figuré à part, est un tambour entaillé et sur les faces duquel la vapeur vient appuyer. La distribution s'opère par le jeu d'un

simple robinet, dont le boisseau commandé par une bielle, est animé d'un mouvement circulaire continu. Une manette, que l'on peut arrêter à volonté sur l'un des crans d'un secteur denté devant lequel elle se meut, permet de régler l'admission, et au

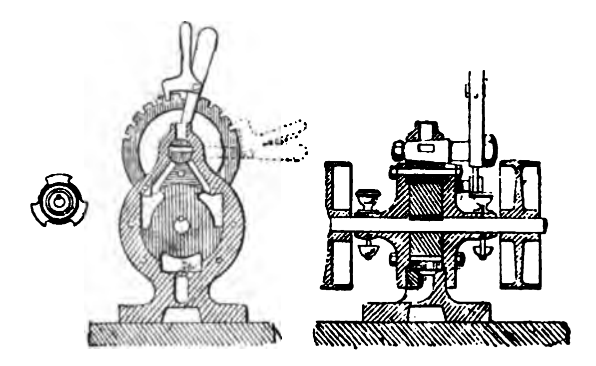


Fig. 43 et 44. — Moteur rotatif Bambel (coupes).

besoin de renverser le sens de la rotation. Ce moteur paraît très simple comme construction, mais sa consommation de vapeur doit être assez considérable et c'est sans doute cette raison qui a empêché sa propagation.

Machine Behrens. — La machine rotative Behrens, d'origine américaine, était basée sur un principe absolument différent des précédentes. L'organe principal, au lieu de présenter la forme d'un tambour monté excentriquement, se composait de deux cylindres découpés, tournant côte à côte, et disposés de telle façon que les reliefs de l'un s'emboitassent exactement dans les creux du cylindre voisin. Ces deux cylindres ou tambours étaient enfermés dans une enveloppe de vapeur étanche. Employé comme moteur, l'appareil Behrens ne donna que des résultats médiocres, tandis qu'il fonctionnait parfaitement comme pompe ; il n'a pas tardé d'ailleurs à être abandonné, bien qu'il paraisse susceptible, en principe, d'être amélioré et de fournir de bons résultats.

Le défaut capital des moteurs à rotation directe réside dans leur énorme consommation de vapeur, bien supérieure à celle des plus mauvais systèmes à mouvement alternatif. L'usure des pièces est également très rapide, ainsi que nous le disions plus haut. A chaque révolution du tambour-piston, les soupapes sont

soulevées ; lorsque la vitesse atteint 1200 à 1500 tours par minute, le frottement devient presque continu ; les parties en contact s'échauffent et, si le graissage n'est pas constamment très abondant, les soupapes et la circonférence du tambour se déforment,

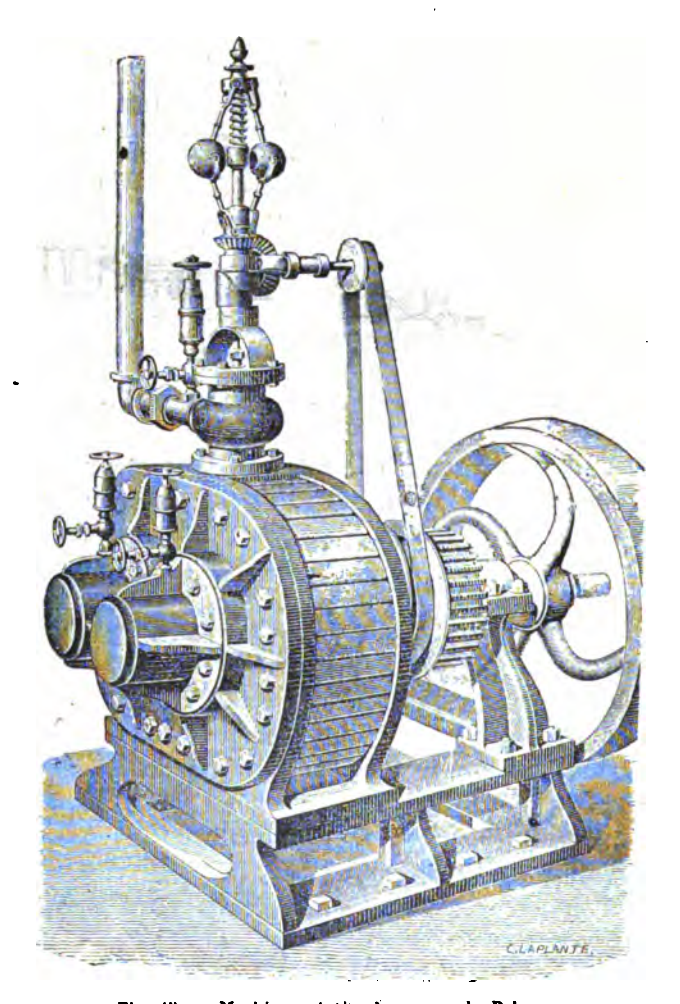


Fig. 45. — Machine rotative à vapeur de Bohrens.

se grippent, alors l'étanchéité disparaissant, la consommation de vapeur dépasse toutes proportions.

Mais le principe du moteur rotatif est tellement séduisant ; il permet de réaliser si facilement des types d'une simplicité et

d'une légèreté extraordinaires qu'il est très compréhensible que les chercheurs se soient acharnés à perfectionner les modèles d'abord très imparfaits construits au début, alors que la question d'économie de vapeur, et par suite de combustible, n'avait pas l'acuité qu'elle a aujourd'hui, où le prix de revient de la force motrice constitue le point capital qui assure le succès d'un nouveau système ou détermine sa ruine. Le moteur rotatif direct serait, en vérité, l'idéal pour une foule d'applications telles que l'automobilisme entre autres; c'est pourquoi on l'a tant travaillé et cherché à améliorer son rendement, surtout dans ces derniers temps. Mais nous verrons, dans le chapitre suivant où nous achèverons la revue de ce genre de moteurs, que l'on est encore resté bien loin de la perfection rêvée, et que, malheureusement, les rotatives ne peuvent encore espérer rivaliser avec les machines à vapeur à pistons à détente qui arrivent à donner le cheval-heure avec une consommation de 7 à 8 kilogrammes de vapeur sèche, ce qui correspond à 800 grammes à peine de charbon. On est encore bien loin d'un pareil rendement avec les moteurs à rotation directe.

Moteur hélicoïdal Filtz. — Ce moteur, comme le suivant, après avoir donné des résultats satisfaisants avec des unités de faible puissance, n'a pas répondu, une fois construit suivant de plus grandes dimensions, aux premières espérances qu'il avait permis de concevoir. M. Filtz avait établi, en 1887, un modèle de trois chevaux qui, placé sur un véhicule léger, actionna cette voiture à une bonne vitesse. Quelques années plus tard, la Société des Etablissements Decauville entreprit la construction d'un type de 70 chevaux, qui ne répondit en rien à ce qu'on était en droit d'attendre, après les indications fournies par le modèle primitif. Il fallut renoncer définitivement à l'espoir de tirer parti de ce système.

Le moteur Filtz, que nous avons décrit en détail dans notre livre les *Moteurs Légers*, était caractérisé par l'action directe de la vapeur sur une pièce mobile calée sur l'arbre de couche, ce qui permettait de supprimer les organes de distribution de la vapeur, les mouvements intermédiaires et les espaces nuisibles. Les pièces en mouvement étant équilibrées, les trépidations étaient évitées, ce qui supprimait les maçonneries de fondation et donnait

un grand avantage pour les applications à bord des bateaux et des voitures.

Le piston mobile, enfermé à l'intérieur d'un cylindre étanche, affecte la forme d'un double T. Les deux faces latérales du cylindre ont une forme hélicoïdale : l'une à pas droit, l'autre à pas gauche. Aux deux extrémités d'un même diamètre du piston, sont logées deux palettes pouvant coulisser à l'intérieur d'une fente ménagée dans le plateau du piston et animées, par suite du déplacement de ce piston, d'un mouvement alternatif de va-et-vient. Il en résulte que, pendant qu'une palette se trouvera complètement repoussée au fond de la rainure, à gauche par exemple, le piston viendra appuyer sur le fond hélicoïdal du couvercle de droite, et l'inverse se produira quand le piston aura effectué un demi-tour.

Un canal d'amenée de vapeur vient déboucher en un point situé

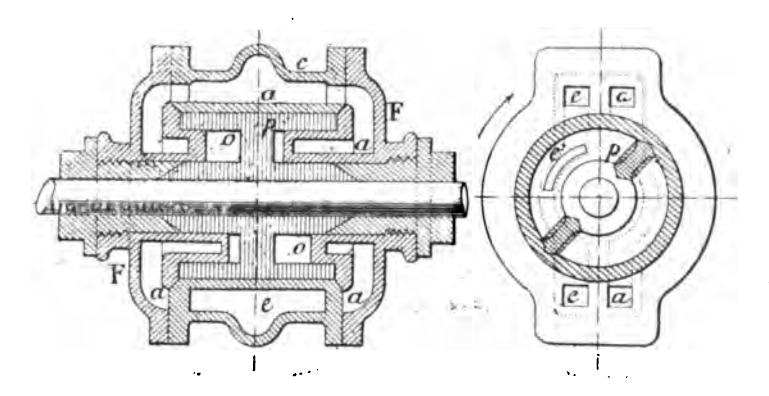


Fig. 46 et 47. — Moteur rotatif Filtz (Coupes).

après celui où le piston est en contact avec le fond du cylindre. L'orifice d'échappement se trouve immédiatement avant ce point et affecte une forme allongée.

A tout moment de la course du piston, le cylindre se trouve divisé en trois compartiments : l'admission de la vapeur s'opère dans le premier ; dans le second, la vapeur précédemment introduite se détend et le troisième se trouve en rapport avec l'atmosphère. Le cycle de fonctionnement, pour une quantité de vapeur donnée comporte donc trois phases : admission, détente, échappement.

L'inventeur a transformé ce moteur en type compound par

l'accouplement de deux machines semblables, mais de dimensions différentes, sur un plateau commun, dont les canaux envoient l'échappement du petit à l'admission du grand cylindre. Pour l'application aux besoins de la locomotion, un dispositif de changement de marche a été prévu. Dans ce but, le moteur est muni d'un tiroir pouvant envoyer la vapeur à volonté dans une autre série de canaux disposés en sens inverse. Le moteur peut ainsi démarrer dans toutes les positions, sauf dans le cas, où, par hasard l'une des deux palettes se trouverait précisément en face de la lumière d'admission.

Le tableau suivant résume les principales données du moteur Filtz :

Puissance		Diamètre du cylindre	Nombre de tours	Poids
—		—	—	—
3 chevaux		94 mm	1.200	60 kil.
5 —		170 —	500	100 —
10 —		200 —	400	150 —
10 —	(compound)	170-250 mm	400	250 —
20 —	—	250-420 —	350	700 —

Avec de la vapeur à 6 kilogrammes de pression, les consommations accusées avec échappement libre, sont de 22 à 24 kilogrammes de vapeur par cheval-heure, au frein, et de 13kg,5 pour le type compound de 40 chevaux, ce qui correspond, pour ce dernier, à 9 kilogrammes de vapeur environ avec la marche à condensation.

Ces résultats paraissaient encourageants ; malheureusement on s'est heurté, cette fois encore à la pierre d'achoppement qui s'oppose à la réalisation de la machine rotative à vapeur : l'usure rapide des rampes hélicoïdales, d'où résulte le défaut d'étanchéité et, au bout de peu de temps, une consommation de vapeur exagérée et hors de proportion avec le travail développé et disponible sur l'arbre.

Moteur épicycloïdal Gérard. — Ce système, qui a paru dans les premières expositions d'automobiles, présentait des dispositions intéressantes. La machine se composait, en principe, de trois disques, disposés excentriquement sur l'arbre de couche, et

roulant à l'intérieur d'un tambour cylindrique en décrivant la courbe comme en mathématiques sous le nom d'*épicycloïde*.

Le fonctionnement s'opère comme suit : Pendant la période d'admission, une pièce en forme de rotule et servant à la distribution, s'incline et donne passage à la vapeur arrivant par un tiroir mobile. La vapeur ainsi introduite à l'intérieur du cylindre agit sur les disques-pistons et l'oblige à avancer d'une certaine quantité. L'introduction cesse lorsque le disque est parvenu à la partie inférieure du cylindre, soit après un tiers de tour environ. Pendant la période de détente qui vient ensuite, l'orifice d'admission est fermé par suite du mouvement de la rotule qui vient l'obturer. La lumière d'échappement n'étant pas encore démasquée, le disque continue sa course sous l'action de la vapeur qui se détend progressivement jusqu'au moment où l'échappement s'ouvre. Les tiroirs et les rotules de distribution sont animés d'un mouvement alternatif, assuré pendant une partie de leur course par des ressorts antagonistes les repoussant à leur position normale.

Les pièces de ce moteur sont simples et robustes, et leur fatigue n'est nullement exagérée, car elles sont soumises, non à des frottements de glissement, mais à des frottements de roulement beaucoup plus doux. Le frottement le plus important est celui des disques sur la partie excentrée de l'arbre, mais il est atténué en grande partie par un roulement sur une couronne de billes, semblable aux coussinets à billes employés dans les cycles et les automobiles.

Le moteur épicycloïdal Gérard est donc une machine rotative à vapeur qui rentre dans la même catégorie que le moteur hélicoïdal Filtz précédemment décrit et qui a été imaginé vers la même époque. Les deux systèmes, qui présentent plus d'un point de ressemblance, possèdent donc, à côté de certaines qualités, de très graves défauts qui, en définitive, ont empêché leur adoption. Parmi les premières, citons l'absence de toutes trépidations et la possibilité de fonctionner, soit à allure réduite, soit à des vitesses allant jusqu'à 24,000 tours par minute, 400 tours par seconde et sans qu'il soit nécessaire d'intercaler des engrenages réducteurs dont la résistance est loin d'être négligeable. Mais ces avantages se trouvent annulés par la consommation exagérée de vapeur et par l'usure rapide des pièces en contact, quel que minime que

puisse être l'intensité du frottement, et ce sont ces inconvénients qui ont empêché la propagation de ces modèles, si originaux à tous égards par leur conception vraiment nouvelle et l'agencement de leurs organes.

Mais il est inutile de se roidir devant les lois inéluctables régissant les mouvements mécaniques, et on ne peut se flatter de conserver bien longtemps l'étanchéité d'un tambour, sorte de piston sans segments, frottant constamment avec une vitesse angulaire fantastique, contre la paroi interne de la boite le contenant. C'est contre cette impossibilité matérielle que se sont brisés les efforts des centaines d'inventeurs qui depuis un siècle ont retourné la question sous toutes ses faces, et c'est dans une toute autre voie qu'il fallait chercher, ainsi que nous le montrerons plus loin, la solution rationnelle du turbo-moteur à vapeur, vraiment industriel et économique.

CHAPITRE VI

Les machines à vapeur rotatives récentes

Malgré l'insuccès définitif qui a toujours été le lot des conceptions de ce genre, — insuccès dont nous avons montré les causes, — on peut cependant reconnaitre qu'il ne se passe pas de mois sans que soient pris, en France ou à l'étranger, de nouveaux brevets ayant pour but de protéger des combinaisons *nouvelles* d'organes devant faire passer la machine rotative directe du domaine du rêve dans celui de la réalité. Hélas ! en réalité, ces conceptions sont frappées *ab ovo* de stérilité, et l'espoir fondé sur des moyens encore inédits de distribution ou de transmission est toujours chimérique. D'ailleurs, le plus souvent, ces inventions ne comportent pas d'idées vraiment géniales ; les dispositions revendiquées dans les modifications sont déjà connues et comptent de respectables antériorités, le problème est tourné mais non résolu et quand on veut passer à la pratique, on s'aperçoit vite de l'inanité de ce que l'on croyait le mot de l'énigme. C'est pourquoi la machine rotative à piston tournant est restée jusqu'à présent un peu comme la pierre philosophale de la mécanique et n'a pu être réalisée.

Nous nous bornerons à décrire, dans ce chapitre, les modèles les plus récents, méritant par quelque côté un moment d'attention, et qui ont vu le jour dans ces derniers temps. La fièvre de l'automobile qui a agité le monde industriel il y a quelques années a fait surgir plusieurs systèmes que l'on eût pu croire alors plein d'avenir et qui n'ont cependant eu qu'une vogue éphémère, tels les moteurs de Nègre, de Jacomy, de Lalbin, etc. La description de ces engins, bien oubliés aujourd'hui, ne présenterait, pour nos lecteurs qu'un intérêt purement rétrospectif et serait fasti-

dieuse. On pourra d'ailleurs la trouver dans les publications techniques de l'époque. Nous nous bornerons, à titre d'exemple, de rappeler les dispositions du type π R^2 d'Arbel et Tihon, qui semblait ingénieusement disposé et n'a eu cependant qu'un succès éphémère, un seul exemplaire d'expérience ayant été construit.

Moteur π R^2. — Cette machine est formée d'un cylindre horizontal surmonté d'un chapiteau contenant les organes de distribu-

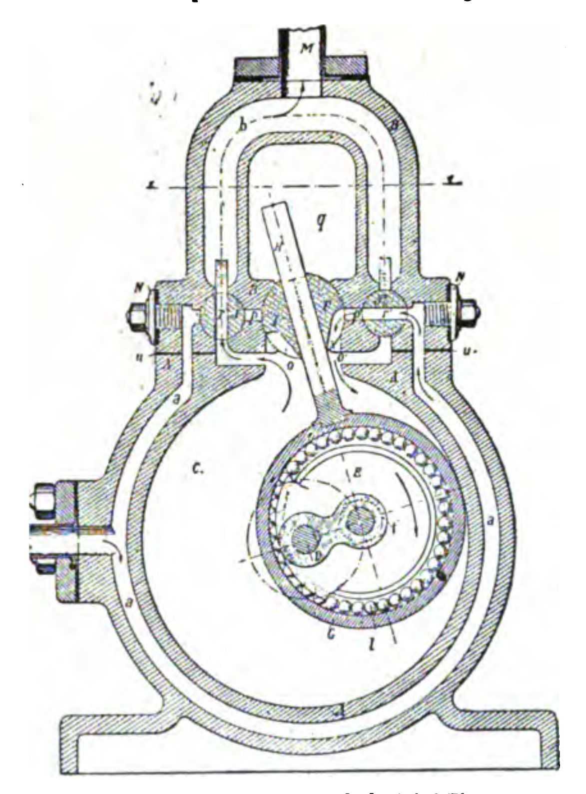


Fig. 48. — Coupe du moteur π^2, de Arbel-Tihon.

tion, de deux fonds ou flasques fermant le cylindre et traversées par l'arbre moteur. Dans son intérieur se meut l'anneau-piston qui transmet la rotation à l'arbre moteur D. Le cylindre est à double enveloppe, et dans l'espace compris entre ces deux enveloppes circule la vapeur ce qui évite la condensation. A l'intérieur du cylindre, et calées excentriquement sur l'arbre moteur, se trouvent

deux cames symétriques réunies à leur centre par une tige à écrou qui permet de régler à volonté leur écartement. Le joint entre ces deux cames est donc placé dans l'axe du motéur et constitue une gorge plus ou moins ouverte dans laquelle vient se loger une couronne de billes trempées. L'ensemble est disposé dans un anneau-piston E portant la cloison de distribution de la vapeur, et dont la profondeur est la même que le cylindre.

A l'intérieur de cet anneau-piston est vissée une bague en acier trempé sur laquelle roulent les billes. Celles-ci servent ainsi d'organe de transmission entre l'anneau-piston qui reçoit la poussée de la vapeur et la came qui transmettra cette pression à l'arbre moteur par un mouvement de rotation.

L'anneau-piston, en se mouvant autour de l'arbre moteur, a constamment l'une des génératrices en contact avec la surface intérieure du cylindre. Il porte dans son sens longitudinal une cloison en acier servant à la distribution de la vapeur, qui s'appuie, comme l'anneau-piston, par ses deux faces latérales, sur les fonds du cylindre.

La hauteur de cette cloison est telle que celle-ci reste toujours engagée par son extrémité supérieure H dans un genou spécial I, disposé dans le chapiteau et qui la guide dans ses mouvements.

Ce genou I est formé par des portions identiques d'un cylindre en bronze auquel on aurait enlevé, en section longitudinale, une épaisseur correspondante à celle de la cloison, les deux segments restants portant deux évidements chargés de démasquer ou d'obturer l'arrivée p dela vapeur. Ce genou se meut à frottement doux dans une alvéole ménagée dans le chapiteau du cylindre et sert d'organe distributeur en ouvrant et fermant l'arrivée de la vapeur sur l'anneau-piston suivant la position que ce dernier occupe dans le cylindre.

Deux robinets r et r', placés de chaque côté du genou, servent à établir, suivant le sens de la marche, soit l'admission, soit l'échappement. La manœuvre simultanée de l'ouverture d'un des robinets et de la fermeture de l'autre s'obtient à l'aide d'une seule poignée R (fig. 48) commandant une roue dentée qui engrène avec les deux robinets.

Le renversement de la marche s'obtient donc par la seule manœuvre de cette poignée.

Il en résulte que ce moteur n'a pas de point mort puisqu'il y a

toujours un sens de rotation dans lequel l'anneau-piston se trouve en position de marche. Aussitôt en mouvement, il suffit de renverser la marche si cela est nécessaire, ce qui se fait instantanément par la poignée.

La vapeur, arrivant par la double enveloppe du cylindre passe par l'un des robinets *r* ou *r'*, suivant le sens de la marche adoptée *r'* dans le cas de la figure, et se rend dans le cylindre où elle pousse l'anneau-piston.

Quand l'anneau-piston a fait un demi-tour, c'est-à-dire quand il est à la partie la plus basse de sa course, la cloison H étant verticale, l'admission se ferme par le mouvement oscillatoire du genou qui vient obturer la lumière *p'* du robinet d'admission.

La vapeur admise se détend alors et continue à faire remonter l'anneau-piston.

Lorsque la cloison H reprend sa position verticale, c'est-à-dire quand l'anneau-piston atteint le point le plus élevé de sa course, il y a un instant communication entre tout l'intérieur du cylindre avec l'échappement par le deuxième robinet *r*. Immédiatement après, l'évidement du genou découvre à nouveau la lumière du premier robinet, et il y a une admission de vapeur nouvelle avec reproduction du cycle que nous venons de décrire.

Le graissage est obtenu par un seul graisseur qui lubrifie tous les organes.

Il faut remarquer de suite que dans ce moteur il ne peut y avoir de contre-pression, puisque le cylindre est toujours en contact avec l'atmosphère ; seule, une faible déperdition serait à craindre par les faces latérales de l'anneau-piston.

Une disposition très originale permet l'étanchéité parfaite.

Sur toute la surface des faces latérales de l'anneau-piston et de la cloison, on a ménagé une série d'alvéoles empiétant les unes sur les autres, dans lesquelles ont été introduits à grande compression des bouchons de liège affleurant la surface du métal. Sous l'influence de l'humidité de la vapeur ces lièges gonflent et viennent s'appliquer contre les faces du cylindre formant un jour parfait et à frottement très doux.

Un moteur du poids de 140 kilos, y compris son volant, fait 6 chevaux avec de la vapeur à 10 kilos. — Son encombrement est de 350 $\times$ 300 et 600 de hauteur. Il est donc facilement logeable soit pour l'automobile, soit pour la navigation de plaisance.

Encore une fois, et malgré les qualités que semblait présenter ce dispositif, la pratique n'a pas sanctionné les espérances que faisaient concevoir les premiers essais. Des défauts incoercibles se sont montrés auxquels on n'a pas su porter remède, malgré les modifications apportées dans la construction et, de guerre lasse, il a fallu abandonner cette invention. Constatons en passant qu'il est bon de se méfier des promesses fallacieuses du début et qui se trouvent si souvent controuvées à l'usage. Beaucoup d'innovateurs, comme l'auteur du πR^2 cherchent, travaillent, trouvent quelquefois des choses intéressantes, mais ils ont alors le plus grand tort de présenter tout aussitôt comme pratique et industriel ce qui n'est qu'une ébauche à laquelle il serait nécessaire de travailler longtemps encore si l'on veut que cela marche sans accrocs constamment renouvelés. Il faut avoir une sage défiance des affirmations optimistes des inventeurs ; c'est là un principe démontré maintenant puisque tant d'entre eux, enthousiasmés de leur œuvre ont le tort de la présenter comme une merveille, quand ce n'est souvent qu'un embryon souvent mal venu.

Moteur rotatif Ghersi. — Cet appareil, inventé il y a quelques années, peut être actionné par la vapeur ou par les gaz provenant de l'explosion d'un mélange détonant ; mais il ne comprend pas la chambre proprement dite nécessaire dans ce second cas.

Le moteur se compose de deux chambres identiques à phases alternantes et dont nous allons indiquer le fonctionnement. La figure 49 représente la vue de profil des trois chambres, c'est-à-dire du moteur entier.

Pour le fonctionnement de ce moteur nous nous reporterons aux figures représentant des coupes, l'une suivant l'axe de rotation, l'autre perpendiculairement à cet axe.

L'arrivée de la vapeur ou du gaz comprimé se fait par le tube V. Chaque tambour fondu d'une seule pièce, est fermé d'un côté par une partie mobile. Ce tambour porte, sur une partie de sa circonférence intérieure, une rampe E laissant dans le restant du tambour un espace vide D, formant chambre à piston. Au centre du tambour tourne une roue pleine A, fixée à l'arbre moteur B, remplissant le centre du tambour et venant passer très près de la rampe E sans y frotter. La roue A et l'arbre B portent une entaille

les traversant par l'axe dans toute leur épaisseur. Cette entaille donne passage à une clavette-piston C, plus étroite que la roue A, mais s'ajustant complètement aux parois de la chambre à piston D, et pouvant effectuer librement un mouvement glissant de va-et-vient dans cette entaille. Cette clavette-piston a ses angles légère-

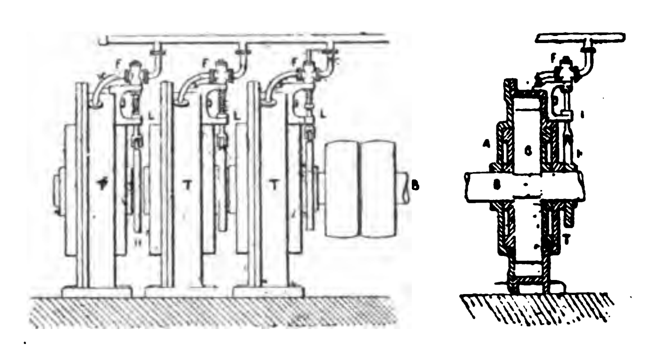


Fig. 49 et 50. — Moteur à gaz tonnant de Chersi.

ment arrondis aux deux extrémités ; elle a une longueur égale au diamètre de la roue pleine A, augmenté de la différence existant entre le diamètre de cette roue et le diamètre intérieur du tam-

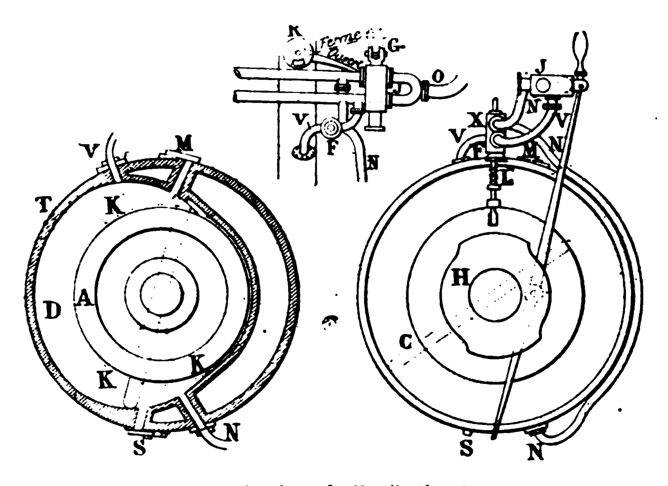


Fig. 51, 52 et 53. — Détails du mécanisme de distribution dans le moteur rotatif Chersi.

bour T. En sorte que si l'on fait tourner la roue A, la clavette C reste constamment appliquée par ses deux extrémités, d'une part sur le tambour T, d'autre part sur la rampe E.

Le mouvement est produit, comme nous l'avons dit, par la vapeur ou les gaz comprimés arrivant par le tube V. Supposons que la clavette-piston se trouve un peu à gauche de l'orifice V, la vapeur la chasse vers le bas en entraînant avec elle la roue A et l'axe B, jusqu'à ce que l'ouverture S se trouve démasquée. Puis l'opération recommence comme précédemment, on voit d'ailleurs que, par les orifices N et M la marche inverse peut être obtenue. Les figures 52 et 53 montrent la disposition du mécanisme de la came de réglage de l'admission et du renversement de marche grâce à la manette G.

On voit que l'arbre B entraîne la came H qui, au moyen d'une clavette soulève la tige L qui commande à son tour la soupape F. La came est disposée de façon à établir une détente réglable à volonté. Ainsi que nous l'avons dit il y a trois tambours identiques dont les phases ne concordent pas ; par ce moyen, les trois clavettes qui entraînent l'arbre E se trouvent en même temps dans les trois positions différentes, et le mouvement rotatif s'accomplit sans interruption.

Comme les précédents le moteur Ghersi n'a eu qu'une durée éphémère et il est aujourd'hui oublié.

Moteur à détente Henry. — Toujours dans le but d'obtenir directement un mouvement alternatif, un mécanicien, M. Henry

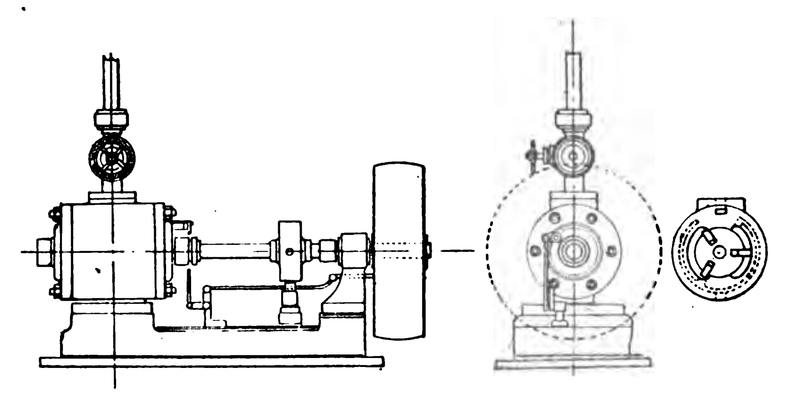


Fig. 54 et 55. — Moteur rotatif à détente système Henry.

est parvenu à établir un modèle que nous allons décrire rapidement. Le cylindre (fig. 54) est traversé par l'arbre moteur sur le-

quel se trouve calé le disque moteur, lequel porte 3 lames mobiles constamment appuyées sur le pourtour du cylindre ou mieux des rainures qui y sont pratiquées.

La vapeur arrivant à la partie supérieure du cylindre y pénètre par un orifice spécial et de là, par les fonds du cylindre, se rend derrière des lames mobiles, qu'elle presse tout d'abord sur tout le pourtour intérieur du cylindre, assurant ainsi au dire de l'inventeur une étanchéité suffisante. La vapeur traverse ensuite un canal coudé placé à l'intérieur des lames mobiles pour venir déboucher dans l'un des trois espaces où elle travaille par réaction sur la lame mobile qui se met à tourner en sens inverse, entraînant ainsi le disque et l'arbre moteur à une vitesse qui atteint facilement 600 tours à la minute ; puis la vapeur après une 1/2 révolution, s'échappe par des conduits d'évacuation disposés en conséquence et ainsi de suite, chaque lame rentrant dans son logement au moment de l'échappement par le fait même de la disposition des rainures pratiquées partiellement sur le pourtour du cylindre.

Lorsqu'une lame rentre dans son logement et atteint son point mort, la suivante est au commencement de la période d'admission et la troisième est en plein travail, de telle sorte que la pression exercée sur le disque moteur est continue et que le moteur n'a lui aucun point mort.

On peut régler la durée d'admission de la vapeur et par suite le degré de détente dans chacun des espaces, par un obturateur manœuvré par des tiges obéissant elles-mêmes à l'action d'un régulateur centrifuge placé dans le volant de la machine ; mais le moteur peut naturellement fonctionner à détente fixe, en supprimant l'obturateur.

M. Henry se proposait d'adopter ce moteur à un motocycle. La chaudière spéciale devait être chauffée par un brûleur à pétrole.

Quoique ce dispositif soit rudimentaire, l'idée de ce moteur rotatif est intéressante, si, comme l'affirme l'inventeur, l'étanchéité des lames mobiles, qui en constituent l'organe essentiel est bien réellement suffisante. Mais il est probable qu'une fois de plus, la pratique n'a pas répondu aux efforts, car on n'a plus entendu parler ni du moteur Henry ni d'aucune de ses applications.

Moteur Hult. — C'est encore un système créé en vue surtout

de la locomotion mécanique, car, pour beaucoup de mécaniciens, le moteur rotatif est l'appareil idéal à employer en automobilisme. Avec lui en effet, le confortable des occupants de la voiture est positivement assuré. Plus de chocs, plus de trépidations affolantes, grande douceur de roulement. Quelle réalisation séduisante consistant à affranchir nos machines motrices de ces irrationnels mouvements rectilignes alternatifs qu'il faut aussitôt convertir en mouvement circulaire continu, à les débarrasser de ces vibrations parasitaires inéluctablement occasionnées par les rapides changements de sens du mouvement des organes et qui constituent une source inépuisable de déperdition de puissance en même temps qu'une cause d'usure non négligeable ; à côté de cela, facilité d'obtention, sans nombreux intermédiaires gourmands d'énergie, des vitesses justement nécessaires et choisies pour l'attaque de l'outil à actionner, enfin diminution de l'espace occupé par la machine.

Le lecteur n'aura pas manqué de remarquer, dans l'énorme confrontation des richesses industrielles des nations que fut l'Exposition de 1900, les produits et appareils dont il peut tirer profit. Le visiteur à l'œil renseigné se sera donc arrêté dans le compartiment de la section suédoise du palais de l'Electricité, aux moteurs rotatifs à vapeur système Hult accouplés directement à des dynamos. C'étaient les premiers types introduits en France, et bien que d'invention relativement récente, ils sont déjà fort répandus dans les pays scandinaves.

Tous les moteurs rotatifs à vapeur ont à satisfaire à une condition de fonctionnement qu'il est extrêmement malaisé de remplir en pratique. Qu'on remarque bien qu'il ne s'agit pas ici des turbines basées sur le principe d'action de la force vive de la vapeur.

Essentiellement, quel que soit le système, de la vapeur à des états de tension différents occupe, dans le cylindre moteur, deux compartiments séparés par une cloison mobile. La condition indispensable d'un bon fonctionnement requiert une parfaite étanchéité de la cloison séparative.

L'expérience a révélé que dans les machines à grande vitesse angulaire, l'usure produite par les frottements de glissement entre les surfaces en contact détermine assez promptement un jeu entre les diverses pièces. Le moindre jeu entre les organes rotatifs compromet l'étanchéité; il en résulte, par voie de consé-

quence, une majoration de la consommation de vapeur. Mais si, d'autre part, pour assurer un joint absolu, on établit un serrage énergique entre les pièces en mouvement, la puissance dépensée

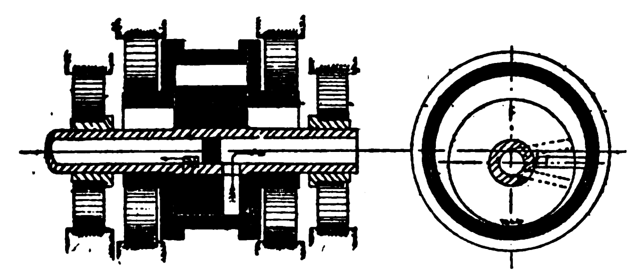


Fig. 56 et 57. — Coupes du moteur Hult.

pour vaincre le frottement de glissement est si grande que le rendement final s'abaisse notablement.

Les frères Hult ont éliminé ces deux causes de diminution de rendement en substituant le frottement de roulement au frottement de glissement et en le maintenant au strict minimum. Se basant sur ce principe, ils sont parvenus à un dispositif mécanique réalisant l'étanchéité entre le cylindre et le piston.

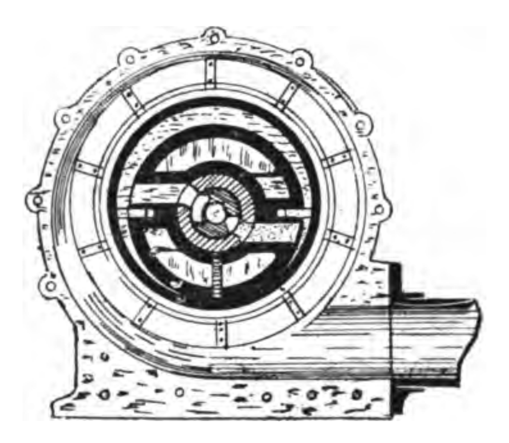


Fig. 58.

Les figures 56 et 57 sont des représentations schématiques de la constitution du moteur.

Le piston rotatif est fixé sur un arbre creux qui se pose sur

deux couronnes d'anneaux élastiques en acier. Le cylindre disposé excentriquement par rapport au piston est supporté, comme ce dernier, par deux autres couronnes d'anneaux élastiques. Le piston entraîne par frottement de roulement le cylindre dans son mouvement de rotation, ils sont doués tous deux de la même vitesse circonférentielle. L'adhérence entre la ligne de contact du piston et de la paroi interne du cylindre étant réglable à volonté, le joint entre ces deux organes est rendu parfaitement étanche. Un tiroir est logé et coulisse dans une mortaise pratiquée suivant toute la hauteur du piston, il est maintenu constamment appliqué contre la paroi intense du cylindre par l'effet de la force centrifuge.

La vapeur arrive par l'arbre creux, traverse ensuite le canal ouvert dans le piston et agit sur le tiroir, d'abord à pleine pression, puis par détente. Les flèches indiquent la direction du mouvement. Après une révolution complète, le tiroir se retrouvant à la ligne de contact entre le piston et le cylindre, l'espace compris entre ces deux organes est rempli de vapeur ayant accompli son travail d'expansion. Aussitôt que le tiroir dépasse la ligne de contact, la vapeur s'écoule par le canal d'échappement, en même temps la vapeur vive venant de la chaudière commence à agir sur l'autre face du tiroir.

Toutes les parties mobiles du système, à l'exception de l'extrémité de l'arbre moteur sont encloses dans une enveloppe fixe servant de bâti. Un godet graisseur unique sert à la lubrification, la matière grasse est entraînée par la vapeur qui circule dans toute l'enveloppe avant son évacuation à l'air libre ou au condenseur.

La figure 58 représente une section transversale d'un moteur d'automobile permettant d'en reconnaître les éléments, le mode de suspension élastique de l'arbre sur ces deux couronnes d'anneaux ainsi que celui du cylindre placé excentriquement. Le renversement du sens de la marche s'opère par une douille disposée dans l'intérieur de l'arbre.

Dans cette douille est pratiquée une lumière qui met alternativement en communication avec la vapeur venant de la chaudière et avec l'atmosphère ou le condenseur, l'un ou l'autre des compartiments que forme dans le cylindre la palette du tiroir. La douille de distribution se manœuvre de l'extérieur au moyen d'un levier à main. Lorsque ce levier est incliné dans un sens, la

marche est progressive, incliné en sens opposé, la marche est inversée. De chaque côté de la palette du tiroir, un canal est creusé dans l'épaisseur du piston et, suivant l'orientation du levier agissant sur le distributeur, chacun de ces canaux sert tantôt de lumière d'admission, tantôt de lumière d'échappement, Généralement, deux tiroirs situés, dans des positions contraires diamétralement opposées coulissent dans l'épaisseur du piston.

Un régulateur à force centrifuge commande une soupape d'admission équilibrée. En agissant sur le ressort de ce régulateur on a la faculté d'admettre dans le distributeur un volume de vapeur correspondant au travail extérieur demandé.

La consommation de vapeur, dans les moteurs Hult, est sensiblement égale à celle des unités de puissance analogue avec piston à mouvement rectiligne alternatif et des turbo-moteurs à force vive. Des essais effectués avec un moteur type de 15 chevaux il est résulté que la dépense de vapeur, par cheval et par heure, n'était pas supérieure à 17 kilogrammes, avec échappement à l'air libre. Les moteurs Hult ont d'ailleurs paru assez intéressants au jury de l'Exposition pour mériter une médaille d'or.

La *Compagnie Générale Électrique* de Nancy est aujourd'hui concessionnaire des moteurs Hult, qu'il serait à souhaiter de voir se répandre en France, car ils présentent de très réels avantages en raison de leurs qualités particulières qui les désignent à de nombreuses applications, notamment à l'industrie électrique et à la navigation.

Machine rotative Sullivan. — Ce système a pour auteur un ingénieur très connu aux États-Unis pour ses inventions relatives aux appareils électriques et plus spécialement à la téléphonie. Il diffère sensiblement dans sa forme extérieure du type courant à piston ; il a l'apparence d'une caisse circulaire ou rectangulaire en fonte, d'où ne sort que l'arbre moteur. Le principal avantage de ce moteur est sa forme restreinte et compacte, sans que cette réduction énorme de métal ait entraîné une diminution de résistance des organes aux efforts mécaniques, à l'usure et aux surcharges.

La figure 59 montre, en élévation, le moteur ordinaire, à simple effet. On voit que l'ensemble du cylindre, du piston et de sa tige, est remplacé par une chambre de vapeur extensible, dont

les deux parois mobiles sont articulées, au moyen de rotules à rouleaux, entre elles, au bâti et à une biello actionnant l'arbre. Bien que ce ne soit pas là un moteur rotatif, les difficultés qu'on y rencontre sous le rapport des frottements et des fuites de

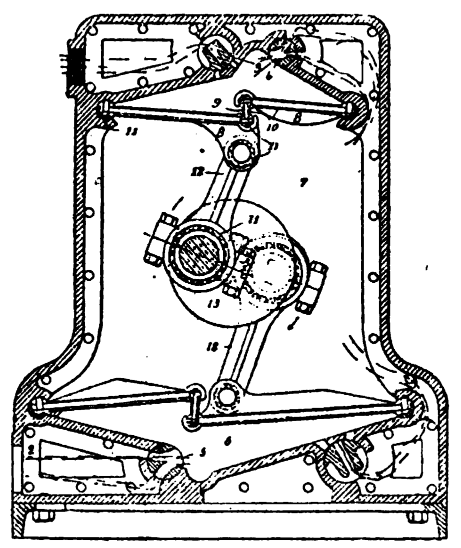


Fig. 59. — Coupe d'une machine compound de 25 chevaux.

1, admission (haute pression). 2, échappement (basse prossion. 3, valves d'admission et d'échappement (haute pression). 4, chambre à haute pression. 5, admission et échappement (basse prossion). 6, chambre à basso pression. 7, corps do machine servant de réservoir de vapour. 8, parois mobiles. 9, articulations. 10, garnitures. 11, paliers à rouleaux. 12, biolle. 13, arbre.

vapeur s'y retrouvent dans ce type et y ont été heureusement surmontées.

Dans le type circulaire (fig. 61), destiné à l'accouplement direct avec les génératrices électriques et aux services de la marine, la bielle est supprimée et remplacée par un excentrique ; les chambres extensibles sant réparties en nombre variable, autour du bâti circulaire et, la vapeur y étant admise successivement, elles viennent à tour de rôle exercer leurs efforts sur l'excentrique au moyen de rouleaux.

Sur les machines fixes, on emploie des tiroirs cylindriques du type Corliss modifié. Dans les machines circulaires, on tait usage

d'un tiroir entièrement nouveau. C'est un tiroir plat, équilibré et actionné par un excentrique calé sur l'arbre moteur. Dans la figure 59, on apercoit la ligne de séparation entre le tiroir et son siège ; l'excentrique lui imprime un mouvement circulaire, mais les bagues de guidage le font dévier de façon qu'il se meuve en ligne

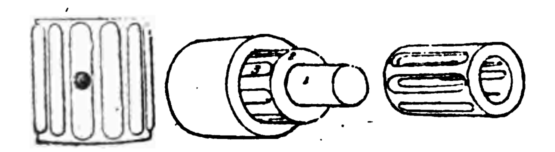


Fig. 60. — Paliers à rouleaux.
1, tourillon. 2, châssis des rouleaux. 3, rouleaux.

droite devant les lumières d'admission. La bague de guidage étant elliptique, le tiroir est libre de se mouvoir dans une direction à l'intérieur de la bague, et il est guidé par des articulations fixées

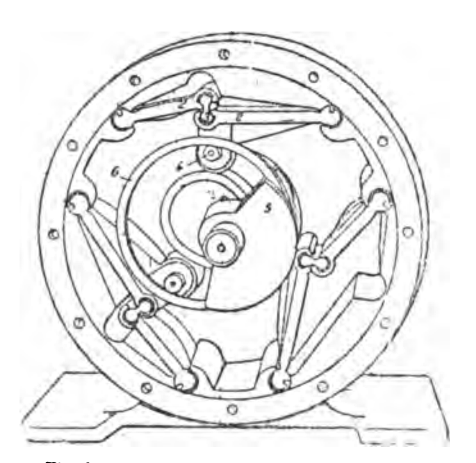


Fig. 61.—Vue intérieure d'une machine marine.
1, bâti. 2, parois mobiles. 3, articulations. 4, tourillons à rouleaux actionnant l'excentrique. 5, excentrique. 6, bague de guidage.

d'un côté au tiroir et de l'autre à la bague. Ces deux derniers reçoivent ensemble un déplacement perpendiculaire au premier et sont guidés par d'autres articulations fixées d'une part au siège et de l'autre à la bague.

Les figures reproduites ici, d'après le journal la *Revue Industrielle*, montrent l'attention qui a été apportée à l'exécution des

rotules ; les tourillons, les rouleaux et les coquilles sont tous en acier trempé et rodé. Les supports des rouleaux reçoivent un soin d'exécution destiné surtout à réaliser un parallélisme parfait entre les rouleaux et les tourillons, afin d'éviter toute torsion et tout coincement des rouleaux. Les fuites de vapeur sont évitées au moyen de garnitures empêchant l'usure, mais sur lesquelles l'auteur ne donne pas de détails.

Le mécanisme de renversement se fait par un simple mouvement de levier ; une autre qualité est l'absence de vibrations et de chocs, ainsi qu'une faible inertie des pièces en mouvement. La construction de ce moteur permet l'emploi de la vapeur surchauffée à hautes pressions. Enfin, une série d'essais effectués au Laboratoire de l'Université Mc Gill a montré l'économie de vapeur réalisée, ainsi que les grandes vitesses que l'on pouvait atteindre. Les essais ont donné les résultats suivants :

Machine à simple effet de 12 chevaux

N° de l'essai	chevaux au frein	tours par minute	vapeur par cheval heure	pression kg par cm²	charge
1	5,63	650	37,6 kg	3,08	1/3
2	10,2	707	18,3 »	3,7	2/3
3	13,1	726	16,5 »	5,88	pleine

Les auteurs du rapport signalent que les variations de vitesse de 650 à 725 tours par minute ont peu changé la consommation de vapeur et que les résultats atteints ne l'ont jamais été avec une machine simple de cette puissance ; ils devraient être encore plus favorables avec une machine compound, comme le montrent les nombres suivants :

Machine à double effet de 25 chevaux

pression de vapeur	charge	consommation de vapeur par cheval-heure	vide cm de mercure
7,42 kg	23 chvx	11,45 kg	62,5
4,32 »	14 »	12,95 »	57,2

Ces résultats confirment d'autres essais de l'inventeur sur la même machine.

Le directeur du laboratoire a pu prendre des diagrammes qui montrent l'absence presque totale de pertes dans cette machine. Il est à prévoir, en effet, que les pertes dues à la condensation, qui atteignent 25 à 70 0/0 dans les machines ordinaires, seront presque entièrement éliminées avec des vitesses de près de 1.000 tours par minute. L'inventeur attribue le rendement élevé précisément à la possibilité d'atteindre ces grandes vitesses en diminuant les pertes par condensation et par fuites sous le piston et le tiroir. La légèreté des pièces soigneusement équilibrés, permet, en effet, des vitesses de 2.500 tours par minute sans que la stabilité du bâti en souffre.

Pour le type circulaire, on n'emploie pas de volant : ce qui en fait un moteur léger très approprié à l'équipement des automobiles, pour lesquels on construit un type spécial ne pesant que $22^{k},4$ pour une puissance de 6 chevaux.

Les avantages de cette machine pour la génération de l'électricité sont de même ordre que ceux des turbines à vapeur. Au lieu de la multiplicité des organes de transmission, le moteur est simplement placé sur un léger prolongement du socle des dynamos, et son encombrement est même moindre que celui de la génératrice. De plus il semble présenter sur le turbo-moteur une certaine supériorité due à l'absence d'organes de réduction de vitesse et de quelques dispositifs délicats nécessités pour le réglage de la grande vitesse de rotation.

Nous pourrions encore donner ici la description de plusieurs modèles de machines rotatives dont les brevets ont été pris en France ou à l'étranger pendant l'impression de ce volume, mais ce qui précède nous paraît suffisant pour montrer l'état de la question, et les derniers systèmes inventés ne présentant aucune nouveauté géniale permettant de leur supposer la moindre supériorité sur les types primitifs.

CHAPITRE VII

Historique et Théorie des Turbines à vapeur

Le développement formidable pris par le machinisme au cours du siècle qui s'est terminé sur une apothéose splendide rendant tangibles à tous les innombrables progrès réalisés, grâce aux conquêtes de la science sur la nature, les besoins sans cesse grandissants de l'industrie, la nécessité générale de produire au meilleur marché possible, toutes ces causes réunies ont obligé les ingénieurs et les constructeurs à serrer de plus en plus près le problème primordial de la production des forces motrices.

L'Exposition de 1900 a montré que le moteur à vapeur, cette création de Papin et de Watt, avait été porté à son plus haut point de perfection et qu'il n'y avait plus à espérer de nouvelles améliorations dans les dispositions connues et étudiées à fond par plusieurs générations de mécaniciens. On a donc été conduit à rechercher des conceptions complètement différentes, dans le but d'augmenter le rendement en travail du calorique transformé en vapeur dans la chaudière, et également dans l'intention de diminuer autant que possible les dimensions d'encombrement, le poids et le volume des moteurs pour une même puissance développée.

Il est permis d'affirmer que ce programme a été rempli par l'invention de la turbine à vapeur, laquelle est basée sur un principe tout à fait différent de celui des machines rotatives que nous avons étudiées au cours des chapitres précédents de cet ouvrage. En effet, dans le turbo-moteur, la vapeur n'agit plus par sa pression sur une cloison mobile se déplaçant par la détente du fluide, mais bien par sa force vive, absolument comme cela se produit dans les turbines hydrauliques. La vapeur arrivant du générateur se détend complètement ou en partie pendant le trajet de la valve

d'introduction à l'orifice du distributeur et arrive sur les aubes de la roue mobile animés d'une vitesse considérable. Comme la densité de la vapeur détendue est très faible, cette vitesse constitue donc le principal facteur de la force vive utilisée par l'organe mobile.

Pour éviter toute cause d'erreur et de confusion dans l'esprit du lecteur, il nous semble nécessaire d'établir dès maintenant une classification des divers modèles de turbines à vapeur actuellement en usage. On peut donc distinguer.

1° *Les turbines à action* ou à impulsion, dans lesquelles la vapeur préalablement détendue au degré voulu dans le distributeur, n'agit uniquement que par sa force vive sur la roue à aubes.

2° *Les turbines à réaction*, dans lesquelles la détente de la vapeur n'est que partielle à l'intérieur du distributeur, et s'achève dans l'aubage de la roue mobile.

Dans les turbo-moteurs dus à Parsons et dans les turbines Rateau, ces différences sont moins tranchées. Ce sont, en réalité, des appareils mixtes participant des avantages et des inconvénients des deux catégories, tout en se rattachant de plus près à la deuxième. Par contre, la turbine de Laval, avec sa roue unique, ses distributeurs réglables, sa grande vitesse de rotation, appartient nettement à la première classe.

De toute façon, dans ce genre de moteurs, le problème à résoudre consiste dans la transmission de l'énergie cinétique (totale ou partielle) d'un jet de vapeur à une pression et à une vitesse données, à une roue mobile à aubes, de laquelle la vapeur doit ensuite sortir avec une pression donnée constante, c'est-à-dire à une vitesse également constante. Ce problème ne peut être résolu que par un tracé approprié de la tuyère, du profil de l'aube et de l'ailette directrice s'il en existe. Ce profil peut être déterminé au moins approximativement en se basant sur les lois de l'écoulement de la vapeur, et par des considérations cinématiques sur la composition des forces et des vitesses.

Il faut d'ailleurs remarquer que la forme de la tuyère influe notablement sur la proportion de chaleur transformée en énergie cinétique, une tuyère convergente très effilée ne permettant la transformation d'une quantité de chaleur bien moindre qu'une tuyère divergente.

Les turbines à vapeur doivent donc être étudiées à deux points

de vue : le point de vue thermique, afin de déterminer les dimensions des passages de vapeur et la vitesse d'écoulement de celle-ci et le point de vue cinématique qui permet de déterminer la meilleure forme à donner aux aubes mobiles et aux ailettes directrices.

On sait que la prodution du travail mécanique, dans des cylindres de machines à vapeur ordinaires, est basée sur le fait qu'on ne laisse pas prendre au piston, et par suite à la vapeur, une vitesse notable, mais qu'on oppose toujours à l'expansion du fluide une résistance égale à sa propre pression. En un mot, on tend à réaliser un cycle réversible d'opérations, en utilisant la pression de la vapeur, et le rendement est donné, à la limite, par celui du cycle de Carnot :

$$\frac{T_1 - T_0}{T_1}$$

On est loin, en pratique, de ce rendement, de sorte que, dans de bonnes machines fonctionnant entre des limites de température pour lesquelles le rendement théorique serait de 30 0/0, par exemple, on n'obtient, dans les cylindres, que le tiers ou le quart seulement de cette quantité, soit de 7,5 à 10 0/0 de l'énergie potentielle du combustible.

Ceci pour des raisons multiples, dont les deux principales sont :

1° Que ces machines ne réalisent pas le cycle théorique de Carnot, mais un cycle, dit *pratique*, qui en diffère en ce qu'on n'utilise pas toute la détente de la vapeur, et qu'on ne la ramène pas graduellement, à la fin de l'opération, à la pression initiale de la chaudière par une compression adiabatique.

Pour produire dans une machine à condensation une chute de température de 152° à 35° qui est la température des condenseurs, il faudrait détendre quarante-cinq fois au moins la vapeur admise au cylindre. Jamais on ne fait aussi longue détente.

2° Que les opérations successives qui se font, tantôt à la température de la chaudière, tantôt à celle du condenseur, ont lieu dans un seul et même récipient, le cylindre, qui tend à prendre successivement ces températures, d'où condensation de la vapeur, au moment de l'admission, sans production de travail utile. Une partie de cette chaleur prise par les parois est bien utilisée, il

est vrai, pendant la détente (*la revaporisation*), mais dans des conditions défavorables, avec une moindre chute de température, en sorte qu'il y a transport de chaleur de la chaudière au condenseur, auquel ne correspond pas de travail utile (*perte à l'émission, refroidissement au condenseur de Hirn*). Le rayonnement continu des divers organes enlève, en outre, une certaine quantité de chaleur qui n'est pas utilisée.

Cette influence néfaste des parois est si considérable, qu'un auteur connu, M Thurston, a pu parler de *perfectionnement ultime* des machines à vapeur en appliquant cette expression à un procédé qui diminuerait l'absorption de chaleur par les parois.

Depuis que les causes inévitables du faible rendement générique de cet imparfait transformateur de l'énergie calorique en énergie mécanique ont été établies, depuis qu'en somme la théorie de la machine à vapeur a été nettement posée, on a dû reconnaitre qu'on avait atteint le maximum de ce qu'elle pouvait donner. Les perfectionnements ne pouvaient plus porter que sur ses détails de construction.

L'histoire de la turbine à vapeur ne date pas d'aujourd'hui. Depuis bien des années on s'est dirigé dans cette voie, et, si les résultats ont été négatifs tout d'abord, c'est qu'au début, tout en changeant intégralement l'appareil, on le laissait fonctionner dans les conditions des anciens moteurs, des machines à vapeur ordinaires. Ainsi, la vapeur arrivait en *pression* dans ces nouveaux moteurs, à mouvement rotatif, et la *détente* s'opérait progressivement dans une série de distributeurs-fixes et de roues-turbines. Il en résultait l'obligation d'ajuster avec précision les pièces tournantes, de manière à ne laisser que le jeu strictement nécessaire pour éviter le frottement entre les parties fixes et les parties mobiles, afin de réduire les pertes de vapeur. Une partie de la vapeur allait forcément droit d'un distributeur à l'autre par ces jeux, sans traverser les aubes de la roue intermédiaire. Cette vapeur n'était donc utilisée qu'en ce sens qu'elle pouvait fournir aux parois la chaleur perdue par rayonnement (elle constituait une sorte d'enveloppe de vapeur), et diminuer la condensation de la vapeur qui se détend.

C'était là une cause sérieuse qui affectait le rendement ; d'un autre côté, cette disposition rendait la construction bien délicate et bien compliquée.

On peut nommer un certain nombre d'appareils du même genre; mais la plupart de ces solutions doivent être considérées comme condamnées par la pratique.

La vapeur arrivant au moteur en pression, et, par conséquent, avec la température élevée, la détente s'opérant ensuite progressivement dans le moteur même, il était impossible de maintenir, sinon de réaliser, l'étanchéité qui était cependant la condition *sine qua non* du bon fonctionnement de ces appareils. Le rendement, qui était bon au début, diminuait donc au fur et à mesure de leur fonctionnement, pour devenir industriellement impossible. La vraie solution n'était pas là. Elle n'en était cependant pas loin et ne s'était pas fait attendre.

Au lieu d'utiliser la *pression* de la vapeur, il s'agissait seulement de laisser cette vapeur se détendre d'elle-même, en prenant la *vitesse* déterminée par les pressions des deux milieux où l'on opère (chaudière et condenseur, chaudière et atmosphère ou pression intermédiaire), puis utiliser cette énergie cinétique dans un mécanisme semblable aux turbines, en communiquant à celui-ci sa quantité de mouvement par une modification continue de la direction de la vitesse relative et une réduction graduelle de la vitesse absolue.

Or, nous avons montré dans la première partie de cet ouvrage, qu'on peut faire rendre aux turbines jusqu'à 80 et 85 0/0 du travail dû à la chute de l'eau motrice. On pouvait donc espérer, en appliquant ce mode de transformation, récupérer une beaucoup plus grande fraction de l'énergie utilisable correspondant à la chute de température de la masse gazeuse.

C'est donc la *force vive* seule de la vapeur qui est utilisée dans ce genre de machines. Or, la densité du fluide détendu étant très faible, le principal facteur de cette force vive est la vitesse.

La vapeur, s'écoulant dans l'air sous pression par un orifice de petite section, prend des vitesses considérables qui atteignent 375 mètres par seconde à la pression de 4 atmosphères à la chaudière, et 892 mètres à celle de 10 atmosphères. Ces vitesses sont encore notablement accrues quand le second milieu où s'écoule le fluide a une pression moindre que 1 atmosphère. Par exemple, de la vapeur à 4 atmosphères, s'écoulant dans un condenseur où règne une pression absolue de $0^{atm},1$, acquiert une vitesse de 1070 mètres, et 1187 mètres par seconde si la pression de la vapeur est de 10 atmosphères.

La vitesse de la vapeur à la sortie des conduits étant énorme, il en sera de même de la vitesse de rotation de la roue réceptrice, laquelle tourne, suivant le type des machines, de 7,500 à 30.000 tours par minute, avec des vitesses périphériques variant entre 175 mètres et 400 mètres par seconde.

Un travail considérable pourra donc être transmis à l'arbre de la roue avec des organes de dimensions extrêmement faibles. En effet, l'effort tangentiel est insignifiant ; sur une circonférence de 7 centimètres de rayon à 400 tours par seconde, il ne dépasse pas 7 kilogrammes lorsque la machine produit sa puissance de 10 cheveaux.

Pour une turbine Laval de 10 chevaux, le disque n'a que 12 centimètres de diamètre pour une vitesse de 24.000 tours à la minute ; il est de 30 centimètres pour une turbine de 100 chevaux tournant à 15.000 tours, de 50 centimètres pour 200 chevaux à 9.000 tours et 70 centimètres pour 300 chevaux à 7.500 tours. Avec un disque de 1 mètre de diamètre à 6.000 tours on peut produire une puissance de 600 chevaux. L'arbre d'une machine de 10 chevaux n'a que 5 millimètres dans l'endroit le plus faible et 30 millimètres pour une machine de 300 chevaux.

Si nous voulons maintenant comparer le turbo-moteur actuel avec les anciens types de moteur à vapeur, nous reconnaîtrons qu'en dépit des transformations subies par les détails mécaniques secondaires des machines à vapeur, celles-ci sont restées, dans leurs principes, telles que le génie de Watt les avait conçues. Les perfectionnements du début ont porté sur l'étanchéité des organes et la correction des ajustages, afin que fussent évités les dangers dans le fonctionnement et surtout les pertes de vapeur ; on a ensuite étudié d'une manière raisonnée le travail économique de la vapeur, en vue d'obtenir un meilleur rendement thermique, et, par suite, une économie dans la consommation de la vapeur. On peut dire qu'au point de vue de l'ajustage et du travail mécanique des diverses parties constitutives et des multiples organes de la machine on est arrivé à la perfection absolue. Quant aux procédés poursuivis pour réaliser une économie dans la consommation de la vapeur, nous n'avons pas l'intention de les passer en revue ; mais nous pouvons rappeler les précieuses découvertes qui ont été faites et les dépenses d'ingéniosité auxquelles se sont livrés les inventeurs.

C'est ainsi qu'on a commencé d'utiliser les hautes pressions, qu'on a subdivisé la détente entre plusieurs cylindres, ce qui a donné les machines compound ; qu'on s'est attaché à réduire les espaces nuisibles sans cependant pouvoir exagérer cette diminution sous peine de se heurter à certains inconvénients. De même on s'est efforcé de diminuer les surfaces refroidissantes qui condensent de la vapeur sans quelle puisse jouer aucun rôle moteur, et par conséquent font perdre totalement la valeur du combustible qui avait servi à porter l'eau à l'état de vapeur. On a appliqué d'une façon générale la chemise de vapeur, qui d'ailleurs avait été conçue par Watt, et qui entoure le cylindre d'une enveloppe pleine de vapeur en empêchant ses parois de se refroidir et d'entraîner les condensations de vapeur. On a enfin imaginé la surchauffe de la vapeur, qui supprime ou du moins atténue puissamment les condensations et pertes de vapeur.

Les effets de ces transformations et améliorations ont été bien mis en lumière dans une communication faite par M. Carpentier à la New-York Railway Association et qui donnait le résultat d'essais multiples exécutés à l'Université Cornell. On y voyait, par exemple, qu'avec une machine à tiroir simple et sans condensation la consommation par kilowatt-heure ressortait à $3^k,10$, tandis qu'elle était seulement de $2^k,78$ pour une machine à tiroir compound, toujours du reste sans condensation ; de 2 seulement pour une machine analogue mais à condensation, et enfin de $1^k,65$ pour une machine Compound Corliss. Mais, quoi qu'il en soit de ces progrès, on ne peut néanmoins s'empêcher de remarquer que nos machines à vapeur, après tous ces perfectionnements, ne rendent en travail qu'une partie bien faible de l'énergie théoriquement contenue dans le combustible qu'elles brûlent, tout au plus 8 0/0, 10 0/0 peut-être, et il importait au plus haut degré de remédier à cette dilapidation, à une époque où l'on commence de s'inquiéter de l'épuisement des gisements de houille. Aussi bien, en dehors des pertes thermiques auxquelles sont exposées les machines à vapeur ordinaires il ne faut pas oublier que la machine à pistons est animée de mouvements alternatifs d'autant plus violents que l'on veut faire marcher l'appareil à une plus grande vitesse ; il en résulte des trépidations et des efforts qui sont bien souvent nuisibles et même dangereux ; il est dès lors indispensable de donner à ces moteurs des fondations très solides, et, néan-

moins, les vibrations qu'ils impriment aux bâtiments où ils se trouvent n'en sont pas pour cela complètement supprimées. On sait, en manière de traction sur voie ferrée, combien le moteur électrique est préférable au moteur à vapeur alternatif, précisément à cause des mouvements de celui-ci qui sont réellement préjudiciables à la voie de fer. On peut ajouter que les allures très rapides sont interdites aux moteurs à vapeur à pistons parce que leurs organes, sous l'influence de l'inertie, seraient soumis à d'énormes efforts de rupture.

Il faut dire que depuis longtemps on cherche à créer ou, du moins, à faire fonctionner pratiquement des moteurs rotatifs à vapeur, où la vapeur agit par sa pression sur des palettes, et où il ne se présente pas de point mort ; où il n'est par conséquent pas utile de disposer un volant, où la rotation régulière ne détermine que de légères trépidations. Mais, en somme, le fonctionnement de ces moteurs rotatifs laisse beaucoup à désirer. M. Sauvage, qui connaît bien cette question des moteurs à vapeur, en faisant une analyse et une revue de tout ce qu'on avait pu remarquer en cette matière à l'Exposition universelle de 1900, et après avoir parlé des moteurs rotatifs et montré qu'aucun n'a pu prendre une importance pratique, concluait en disant que, dans la plupart, les mécanismes ne sont que des dérivés des transmissions par manivelle et par bielle qu'ils prétendent supprimer : pour lui la grande nouveauté saillante au point de vue des machines à vapeur, c'était la turbine à vapeur.

Le fait est que c'est principalement la turbine à vapeur, avec les progrès si rapides qu'elle est en train de réaliser depuis quelques années, qui menace de supplanter rapidement la vieille machine à vapeur. Aussi devons-nous insister longuement sur cet engin et sur ses avantages, en même temps que sur les applications qui ne sont faites, à l'heure actuelle.

Sous réserve des différences pourtant importantes qui distinguent les divers types de turbines, on peut dire que la turbine à vapeur est un appareil qui rappelle essentiellement la turbine à eau, une roue à ailettes multiples sur lesquelles de la vapeur vient frapper, au lieu que ce soit de l'eau. Mais alors que l'emploi de la turbine comme moteur hydraulique est couramment pratiqué depuis un certain temps déjà, la turbine à vapeur est un mécanisme de création tout à fait récente. Cependant, il ne faudrait

pas oublier que les inventeurs modernes ont eu au moins deux prédécesseurs dans leurs recherches : d'une part Héron d'Alexandrie, bien connu pour son ingéniosité, qui lui fit imaginer divers petits appareils mécaniques, et qui combina notamment, cent vingt ans avant notre ère, une roue à réaction dont la rotation était assurée par un jet de vapeur venant frapper des palettes ; puis beaucoup plus récemment un savant du XVIIe siècle, Bianca, combina, lui aussi une roue que faisait tourner un jet de vapeur, mais dont il ne sut tirer aucun résultat pratique.

Depuis lors on a considérablement perfectionné cet embryon d'appareil rotatif à vapeur, qui était plutôt une simple roue qu'une véritable turbine, et maintenant les turbines à vapeur se partagent en deux types principaux : les *turbines à réaction*, qui emploient de la vapeur sous pression, et celles qui sont dites à *action* parce qu'elles n'ont recours qu'à la force vive de la vapeur, qui a été au préalable détendue. Comme la vapeur, par cette détente, prend une énorme vitesse, il est facile de prévoir que les turbines du second genre tourneront à une allure autrement rapide que celles du premier, où pourtant une vitesse appelée modérée dépasse sensiblement tout ce que donnent les moteurs à vapeur ordinaires les plus rapides. L'illustre professeur Thurston, qui est une des plus grandes autorités en matière de moteurs à vapeur, considère que la turbine à vapeur doit être économique par son principe même, puisqu'elle est d'une simplicité extrême comme mécanisme, n'ayant qu'une ou plusieurs couronnes qui tournent dans une enveloppe, au lieu des multiples organes de la machine à piston, et qu'elle n'est sujette qu'à des frottements très réduits provenant de la rotation des tourillons qui la supportent.

Elle est soustraite à la cause principale qui entraîne des déperditions dans les machines à mouvement alternatif et qui résultent, comme nous l'avons laissé entendre plus haut, des variations de température des parois intérieures en contact alternativement avec la vapeur très chaude sortant de la chaudière et la vapeur refroidie au moment où elle s'échappe de la machine : dans la turbine, une paroi donnée est toujours à une même température.

La seule cause de perte thermique provient du rayonnement de l'appareil, et quant à la perte thermo-dynamique, elle provient seulement de ce fait que la vapeur motrice peut sortir de l'appa-

reil à une vitesse supérieure à celle qui réduirait la perte à son minimum.

Dans l'étude à laquelle il a été fait tout à l'heure allusion, Thurston a prouvé que la turbine satisfait plus complètement qu'aucun autre type de moteur à vapeur au cycle de Rankine et qu'elle constitue le type de moteur le plus simple et le plus efficace. Pour lui (et naturellement ses conclusions sont appuyées sur les observations les plus sérieuses et les calculs les plus autorisés), la turbine à vapeur se détache de l'idéal théorique envisagé au point de vue thermo-dynamique, elle se prête particulièrement bien aux pressions élevées, que l'on a voulu appliquer à la machine à vapeur ordinaire pour obtenir un meilleur rendement, mais qui ne peuvent être poussées fort loin toujours avec cette machine à pistons que l'on a longtemps considérée comme la seule possible. De plus, la vitesse de rotation de la turbine n'est limitée que par la résistance des matériaux employés dans sa construction, et elle s'accommode au mieux de la vapeur surchauffée, même avec une surchauffe considérable, alors que le graissage des parties frottantes des autres machines à vapeur s'oppose à cet emploi de la vapeur surchauffée. Nous pourrions ajouter encore que sans doute les axes d'une turbine tournent à grande allure ; mais rien n'est plus simple que d'en assurer le graissage dans les meilleures conditions, et que de constituer les coussinets en métal anti-friction ; quant aux pertes par fuites, qui du reste ne sont pas à craindre dans tous les types de turbines, comme nous le verrons tout à l'heure, on peut les éviter par une construction soigneuse qui sera d'autant plus aisée que les parties à ajuster ne sont pas multiples.

Après ces considérations générales, qui militent si puissamment en faveur de ce nouveau moteur, et qui seront du reste confirmées par les détails que nous donnerons sur les divers types de turbines, nous allons indiquer d'une façon précise la construction de ces machines, et aussi fournir des exemples des applications industrielles qu'on en fait dès maintenant avec plein succès.

Historique du turbo-moteur. — De 1791 à 1896, on ne connaît pas moins de 86 types différents de moteurs à rotation directe, et dont un certain nombre présentent des dispositions intéressantes Mais si l'on ne considère que les systèmes possédant

réellement les caractères distinctifs des turbines, le nombre se réduit à 35 se répartissant comme suit :

1° *Turbines radiales centrifuges à axe vertical.* — Deux types : Laroche-Lainé (1844) et Girard (1855).

2° *Turbines radiales centrifuges à axe horizontal.* — Huit types : Pelletan (1838) ; Autier (1839) ; Brünner (1886) ; Parsons (1891) ; Edwards (1892) ; Terry (1893) ; Dow et Hirsley (1894).

3° *Turbines radiales centripètes à axe horizontal.* — Cinq types : Delonchant Parsons (1890) ; Mac-Elvoy (1893) ; Bollmann (1894), et Ferranti (1895).

4° *Turbines radiales mixtes (centrifuges et centripètes).* — Neuf types : Hoel, Brackel et Günther (1863) ; Edwards (1876) ; Clark, Cutler (1879) ; Imroy (1881) ; Demoulin (1884) ; Last (1885) ; Altham (1892), et Morton (1893).

5° *Turbines axiales à axe vertical.* — Huit types : Enbank (1841) ; Romanet (1859) ; Perrigault et Farcot (1884) ; de Laval (1889) ; Wrink (1894) ; Bollmann, Hopkins (1894), et Farcot (1895).

Toutes ces turbines, sauf celle de Laval, qui est à action, sont à réaction. Un certain nombre, celle de Wilson entre autres, présentaient des dispositions qui ont été conservées dans les types suivants, leur valeur ayant été démontrée dans la pratique. Toutefois ces modèles, à part celui de Laval et celui de Parsons n'ont reçu que fort peu d'applications et ont disparu aujourd'hui. Il faut en chercher la raison dans les divers défauts qu'on pouvait leur reprocher et surtout dans leur consommation de vapeur exagérée rendant leur emploi trop onéreux.

Les seuls systèmes dont l'application se soit développée sont ceux créés par Parsons en 1884 et de Laval en 1889. Bien qu'ayant paru en des années différentes, ces deux turbo-moteurs sont absolument contemporains. MM. Parsons et de Laval, dit M. Hart, dans une intéressante étude sur ce sujet, et à laquelle nous empruntons les détails qui précèdent, ont travaillé pour ainsi dire parallèlement et, en suivant des voies et des méthodes différentes, ils sont parvenus à établir les prototypes des turbines à vapeur actuellement en service.

Ces machines fonctionnent, il faut le constater, dans les conditions les plus satisfaisantes, avec une consommation de vapeur très acceptable et même comparable, sinon inférieure à celle des bonnes machines à mouvement alternatif.

N'oublions pas de dire que, depuis leur apparition, d'autres modèles sont survenus. Plusieurs inventeurs se sont consacrés à l'étude de la question, et dans ces derniers temps, M. Rateau, ingénieur au corps des Mines, et la maison Bréguet, dont on connait les travaux en cet ordre d'idées, ont créé de nouveaux types de turbines qui ont fourni des données d'un réel intérêt. On peut donc légitimement penser, devant cette extension progressive, et les progrès indéniables réalisés en si peu d'années, que le succès du turbo-moteur est désormais assuré. Les turbines à vapeur se répandront de plus en plus dans l'industrie et, grâce aux avantages qu'elles possèdent, elles se substitueront petit à petit, aux anciens types de machines alternatives. Il y a sans doute encore certaines difficultés à surmonter, mais les obstacles s'aplaniront avec le temps, et il n'est pas douteux que ces nouveaux dispositifs sont assurés d'un fructueux avenir.

Nous devons encore mentionner, dans cet historique succinct, la transformation subie par le turbo-moteur Parsons au cours de ces derniers temps. Au commencement de l'année 1900, les ateliers Brown-Boveri de Baden, représentés à Paris par la Compagnie Electro-mécanique, ayant obtenu la licence de fabrication de ce genre de machines, construites jusqu'alors par l'inventeur à Newcastle-on-Tyne, les directeurs techniques de ces importants établissements ont poussé avec une extrême activité, — on pourrait même dire avec la plus grande énergie, car il fallait lutter contre des préjugés enracinés, — la construction de la turbine Parsons qu'ils ont portée au plus haut point de perfection.

La tâche à remplir à ce moment était des plus arides, car, à côté du changement complet à apporter dans le mode de construction adopté par l'inventeur, il était nécessaire de perfectionner à des points de vue tout nouveaux, les machines électriques à accoupler avec ces moteurs. La turbine Parsons est une machine de précision qui exige un travail extraordinairement exact et soigné de chaque pièce en même temps qu'une grande expérience. Il fallut créer des ateliers nouveaux avec un équipement et un matériel spécial, et former un personnel nouveau d'ingénieurs et d'ouvriers pour exécuter ce travail. En même temps que l'on créait de toutes pièces cette organisation, on devait lutter contre des jugements positifs, des opinions autorisées dénigrant non sans raison cette forme encore peu connue de machine à vapeur qui venait

concurrencer l'antique machine à piston à mouvement alternatif.

Applications des turbo-moteurs. — L'emploi des turbines à vapeur est tout indiqué lorsqu'il faut développer de grandes puissances avec une vitesse angulaire modérée, et c'est d'ailleurs sous cette forme que s'est propagé l'usage de ces machines. Toutefois dans certains cas spéciaux et surtout pour de faibles puissances, la turbine à roue unique peut présenter des avantages, mais sa grande vitesse angulaire, qui rend nécessaire l'interposition d'un harnais d'engrenages réducteurs qui peuvent dans des circonstances heureusement assez rares présenter quelques inconvénients. C'est surtout pour la commande de génératrices d'électricité que ces moteurs ont été utilisés, et de nombreux groupes électrogènes de toutes puissances, la turbine étant montée sur un socle unique avec la dynamo et accouplée directement avec elle ont été installés récemment.

Les turbines Parsons ont été également appliquées à la propulsion des navires, et nous consacrerons un chapitre spécial à cet usage. Quelques essais ont également été exécutés avec la turbine inventée par M. Rateau et appelée *multicellulaire* par son inventeur. Nous y reviendrons ultérieurement. Pour le moment, contentons-nous de constater, en terminant ce chapitre, que les turbines constituent la formule vraiment rationnelle de la machine rotative tant cherchée, et qu'il s'ouvre devant elle un champ d'action presque illimité, en raison des qualités très réelles qu'elles sont parvenues à acquérir, grâce aux travaux assidus des chercheurs à la fois patients et persévérants que nous avons nommés.

CHAPITRE VIII

La turbine de Laval.

Théorie. — La théorie de la turbine à vapeur de Laval s'établit de la même manière que celle de la turbine hydraulique d'Euler à libre déviation, au moins en ce qui concerne le récepteur. Dans la détermination des distributeurs, il faut faire entrer en ligne de compte les propriétés spéciales des fluides élastiques.

La vapeur saturée sort de la chaudière à une pression déterminée et s'échappe dans l'atmosphère ou dans un condenseur à pression également déterminée, en passant par un *distributeur.*

Ce distributeur doit avoir, du côté de la chaudière, une forme telle qu'elle épouse la veine fluide. Il doit se terminer au point où le fluide, ayant pris la vitesse maximum dont il est susceptible, a sensiblement la même pression que le milieu ambiant. Il ne faut pas qu'il y ait, entre le distributeur et la turbine, un excès de pression, car la vapeur continuerait à s'accélérer dans les aubes et sortirait avec une vitesse trop grande ; ni que la pression tende à baisser dans le distributeur au-dessous de celle du second milieu, ce qui donnerait lieu à des mouvements tourbillonnaires accompagnés d'un réchauffement de la vapeur. Dans les deux cas, on n'utiliserait qu'une partie de la force vive.

En ce qui concerne le récepteur, étant donné qu'il s'agit d'une turbine axiale à libre déviation, pour obtenir le maximum de rendement, on doit remplir les conditions suivantes : L'angle d'inclinaison des aubes distributrices doit être aussi faible que possible.

L'aube de la roue réceptrice doit avoir la direction de la vitesse relative à l'entrée, pour éviter les *chocs.*

La vitesse linéaire de la turbine doit être égale à la vitesse relative de sortie du fluide et par suite, à la vitesse relative d'entrée.

Cette condition détermine l'inclinaison des aubes de la roue réceptrice, qui doit être double de celle des aubes distributrices. L'angle d'inclinaison des aubes à la sortie doit être le même qu'à l'entrée.

La courbe donne des rendements *théoriques* en fonction de la vitesse périphérique du disque pour une même vitesse de la vapeur. Ce rendement pour $\omega = 1.000$ mètres par seconde, serait de 45 0/0 à la vitesse périphérique du disque de 155 mètres par seconde ; il s'élèverait à 73 0/0 à 300 mètres et à 85 0/0 à 400 mètres par seconde, vitesse qu'il serait difficile de dépasser à cause de la résistance même de la matière. Pratiquement, nous aurons des écarts plus ou moins grands entre ces vitesses.

Les considérations d'exécution des aubes ne nous permettront pas non plus d'éviter complètement les chocs. La vitesse relative à l'entrée sera déviée de sa direction normale par l'aube pour suivre une nouvelle direction. Le rendement du distributeur sera abaissé de ce chef de 85 à 75 0/0 environ.

Pour utiliser l'excès de vitesse absolue à sa sortie, on peut recourir à un dispositif dit *compound*, et qui consiste à faire diriger le fluide à sa sortie de la première turbine dans une autre ayant la même vitesse linéaire.

La vitesse relative à la sortie de cette seconde roue réceptrice c_4 se trouve ainsi sensiblement rapprochée de la vitesse linéaire de cette roue et la vitesse absolue à la sortie ω'' de beaucoup réduite. Le rendement se trouve ainsi sensiblement amélioré. D'une manière générale, la vitesse d'un fluide élastique s'écoulant librement d'un milieu dans un autre, sans recevoir ni perdre de chaleur (écoulement adiabatique) est donnée par la formule de Weisbach, qu'on peut écrire :

$$\frac{\omega^2}{2g} = u,$$

u étant le travail gagné par l'unité de poids du fluide en se détendant :

Ce travail est égal à :

$$-\int_{p_0}^{p_1} v\,dp,$$

où v est le volume spécifique et p la pression variant de p^o, celle de la chaudière à p^1, celle du condenseur.

Un schéma donne la consommation de vapeur par cheval effectif et par heure en fonction de la pression d'admission et celle de l'échappement. Les courbes sont tracées en admettant un rendement pratique facilement réalisable de 60 0/0. On peut donc ne pas dépasser, avec la turbine de Laval, par cheval *effectif* et par heure, les chiffres de consommation suivants :

A 6 kilogrammes de pression d'admission, et condensation, le vide étant de 0,1 par centimètre — 7,75 kilos.

A 10 kilogrammes de pression d'admission, et condensation, le vide étant de 0,1 kilogramme par centimètre carré 6,5 kilos.

A 15 kilogrammes de pression d'admission, et condensation, le vide étant de 0,1 par centimètre carré — 6 kilos.

Avec des pressions plus élevées, on arrivera à des consommations plus réduites encore, et c'est là le grand avenir de ces machines.

Nous sommes loin de la limite à laquelle pourront arriver les générateurs. Ils travaillaient à 2 kilogrammes de pression et même à la pression atmosphérique tout au début. Les pressions de 4 kilogrammes étaient considérées comme dangereuses. On est arrivé progressivement à 6, 10 et 15 kilogrammes. Il n'y a pas de raison pour qu'on n'aille pas un jour jusque et au-dessus de 50 kilogrammes. Or, les moteurs à pistons sont incapables de travailler à ces pressions pour des raisons qu'il est inutile de développer ici, tandis que les turbines pourront parfaitement utiliser la vapeur à n'importe quelle pression, puisque celle-ci est transformée en force vive avant d'arriver dans le moteur même.

Il y a dix ans on ne connaissait pour ainsi dire pas les turbines à vapeur dans l'industrie ; aujourd'hui on en compte par milliers.

Il y a quelque temps encore on les appelait les gouffres de vapeur ; aujourd'hui les personnalités les plus compétentes les considèrent comme les machines à vapeur les plus efficaces au point de vue thermique.

Quant aux grandes vitesses qu'on considérait comme la pierre d'achoppement de ce genre de machines, non content de les pratiquer pour les moteurs, on les adopte actuellement pour les appareils à commander : ventilateurs, pompes, bientôt peut-être dynamos, hélices, et l'on y trouve des avantages très appréciables non seulement au point de vue des poids, et par conséquent des prix, mais aussi celui du rendement.

La première installation des turbines de Laval date de 1892. Il y a actuellement près de 3.000 turbines représentant une puissance totale de 85.000 chevaux, dont près de 40.000 chevaux en France seulement.

En fait d'applications, la turbine a été employée comme : *Moteur*, pour la commande des transmissions par courroie ou par

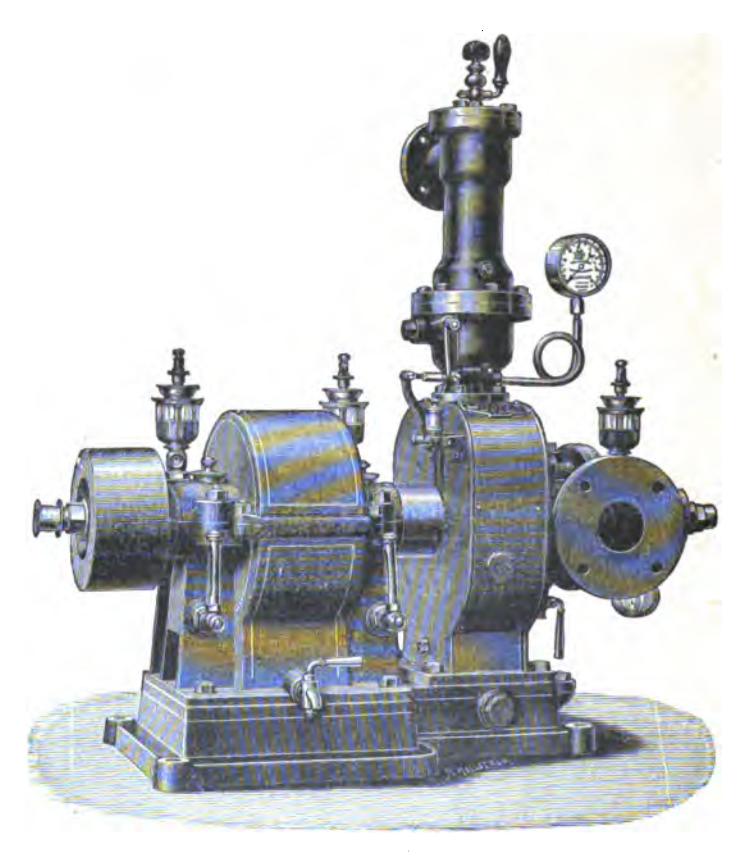


Fig. 62. — Turbine à vapeur de Laval.

câbles. *Turbine-dynamo* ou *turbine-alternateur*, en vue de la production de l'énergie électrique sous ses formes les plus variées, aussi bien pour l'éclairage, l'électrolyse, que pour le transport de force. *Turbines-pompes*, pour les épuisements et élévations d'eau, comme pompe à incendie, etc... *Turbines-ventilateurs*, pour l'aérage, pour le soufflage des feux de forge et cubilots, etc.

Dans toutes ces installations, la turbine Laval a montré ses qualités propres qui lui assurent des avantages souvent très appréciables.

C'est ainsi que son encombrement et son poids sont très faibles. Son installation est des plus simples. Sa mise en marche et son arrêt sont d'une aisance parfaite et ne consistent qu'en une simple manœuvre de valves de vapeur et d'eau, de même que sa conduite et sa surveillance se bornent au remplissage et au maintien en bon état de fonctionnement des graisseurs. Sa régularité de marche est particulièrement remarquable. Il n'y a guère que les moteurs à triple expansion qui puissent lui être comparés.

Quoi qu'en aient dit certains ingénieurs, le rendement organique de la turbine Laval ne varie pas avec le temps. L'usure des aubes, qui peut se produire à la longue, ou dans des conditions anormales, n'a qu'une influence insignifiante sur le rendement, comme le prouvent les essais exécutés sur deux turbines de même puissance, l'une avec un disque à aubes fortement usées qui avait marché pendant cinq ans, l'autre avec un disque complètement neuf. (Essais par le personnel des Usines de Saint-Jacques à Montluçon, appartenant à la Société de Châtillon-Commentry.)

La consommation, dans le premier cas, a été de $10^k,067$ et dans le second de $9^k,702$ par cheval effectif heure. La pression était la même dans les deux cas et le vide plus élevé dans le second cas; par conséquent, si on avait pu maintenir la vide égal dans les deux cas, il n'y aurait pour ainsi dire pas eu d'augmentation de consommation du fait de l'usure des aubes.

Ces résultats sont consignés dans le tableau ci-après:

Tableau I

Essais comparatifs de consommation d'une turbine neuve et d'une turbine ayant fontionné pendant cinq ans.

	Turbine neuve	Turbine ayant fonctionné pendant 5 ans
Durée des essais	10 heures	10 heures
Vapeur consommée aux turbines	8.756 kilos	8.973 kilos
Nombre de tours moyens par minute	1.108	1 076
Pression moyenne aux ajutages	7,5	7,5
Travail moyen des turbines en watts	59.600	59.569
Vapeur consommée par cheval de 660 watts	9.702	10.067
Vide au condenseur	71	64

La consommation d'huile est très réduite. Un groupe électrogène de 100 chevaux, turbine et dynamo, consomme pratiquement 300 grammes environ et celui de 300 chevaux 750 grammes par heure; ce qui représente, à raison de 36 francs les 100 kilogrammes d'huile spéciale employée pour le graissage des turbines, une dépense de $0^{fr},10$ dans le premier cas et de $0^{fr},27$ dans le second à l'heure, soit environ $0^{fr},001$ par cheval-heure.

Son entretien est des plus réduits et sa solidité est tout à fait remarquable même dans des conditions de marche particulièrement difficiles et avec un service ininterrompu de jour et de nuit.

Description du mécanisme. — La turbine de Laval est analogue à une turbine d'Euler à axe horizontal, à introduction partielle et à libre écoulement. Celui-ci est, en effet, caractérisé par l'absence d'une suppression entre le distributeur et le récepteur. Elle se compose d'une roue à aubes, sur laquelle la vapeur complètement détendue est amenée par un ou plusieurs ajutages dont l'axe est faiblement incliné sur le plan de la roue.

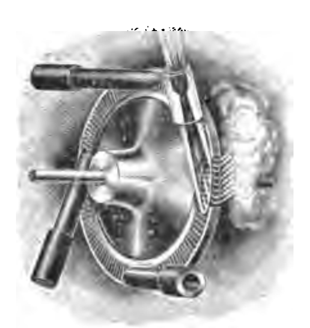


Fig. 63. — Roue mobile de la turbine de Laval, avec les tuyères.

Les jets de vapeur pénètrent dans le récepteur en glissant le long des aubes en vertu de la vitesse relative et en leur communiquant la force vive de la vapeur. Cette vapeur sort sur la face opposée du disque avec une vitesse absolue que l'on cherche à rendre le plus faible possible par un tracé approprié des aubes.

Le corps de la turbine est monté sur un axe en acier qui repose sur deux coussinets à ses extrémités, et tout l'ensemble tourne dans une chambre dont une partie vient de fonte avec un conduit de distribution de la vapeur et porte les ajutages en bronze destinés à détendre et à diriger le jet de vapeur, tandis que l'autre forme conduit d'échappement et comprend le palier de bout d'arbre. Sur l'arbre principal, est placé le pignon en acier à double denture hélicoïdale, s'engrenant avec une roue den tée qui réduit la vitesse de la turbine dans le rapport



Fig. 64. Roues hélicoïdales de transmission.

voulu. Les dents de ces engrenages sont inclinées de 45° et en sens inverse (engrenages à chevrons) pour empêcher les mouvements longitudinaux. N'ayant à subir que des efforts extrêmement réduits ils sont faciles à construire. Pour en assurer le graissage continu, on les renferme dans une boîte en fonte qui fait partie intégrante du moteur et dans laquelle la circulation de l'huile est parfaitement assurée. Cette boîte porte quatre paliers, dont deux, F et D, pour l'arbre de la roue motrice, et deux, O, O, pour l'arbre auxiliaire.

A l'extrémité de l'arbre secondaire se trouve le régulateur à force centrifuge, dont les détails sont représentés sur les figures 65 à 68. Les deux demi-cylindres peuvent pivoter sur la gaîne qui les maintient. Les talons qui servent de base à ces demi-cylindres appuient contre la tête d'une tige agissant par l'intermédiaire d'un levier sur la soupape d'admission. La tige est maintenue par un ressort antagoniste enfermé dans la gaine à l'aide de l'écrou.

Le régulateur agit ainsi sur l'admission de la vapeur et assure une régularité parfaite à la machine, quelle que soit la charge.

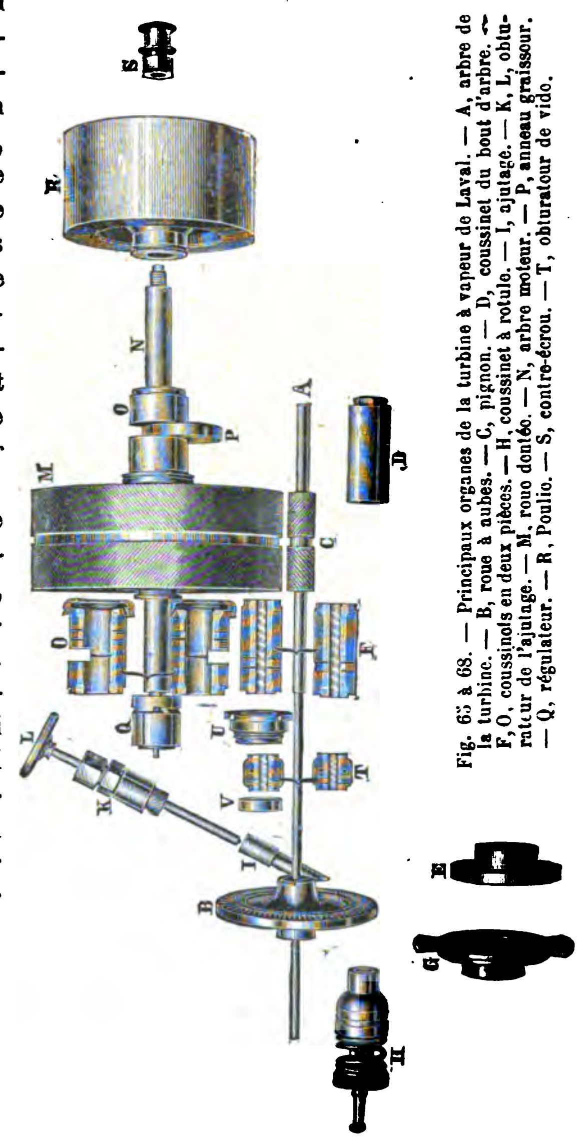


Fig. 65 à 68. — Principaux organes de la turbine à vapeur de Laval. — A, arbre de la turbine. — B, roue à aubes. — C, pignon. — D, coussinet du bout d'arbre. — F, O, coussinets en deux pièces. — H, coussinet à rotule. — I, ajutage. — K, L, obturateur de l'ajutage. — M, roue dentée. — N, arbre moteur. — P, anneau graisseur. — Q, régulateur. — R, Poulie. — S, contre-écrou. — T, obturateur de vide.

En outre, la vapeur, au sortir de la valve d'admission, se ré-

partit en plusieurs conduits, 4, 6, 8, etc., suivant les machines. Ces conduits ou ajutages I peuvent être obturés par des valves à la main manœuvrées de l'extérieur, ce qui permet de réduire à la moitié, au tiers, au quart, etc., la puissance maxima de la machine. On comprend que, par ce moyen, le réglage de la puissance se fasse dans d'excellentes conditions, puisque chaque ajutage fonctionne pratiquement, d'une manière indépendante. Il en résulte qu'une machine donnée ne consomme pas beaucoup plus

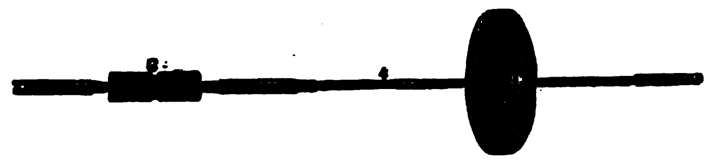


Fig. 69. — Roue motrice, arbre et pignons de transmission.

de vapeur par cheval, à moitié, ou à un quart de charge qu'à pleine puissance.

A l'arrivée de vapeur, il y a une boîte à crépine pour l'épuration de la vapeur.

Une partie délicate du mécanisme et qui a demandé bien des

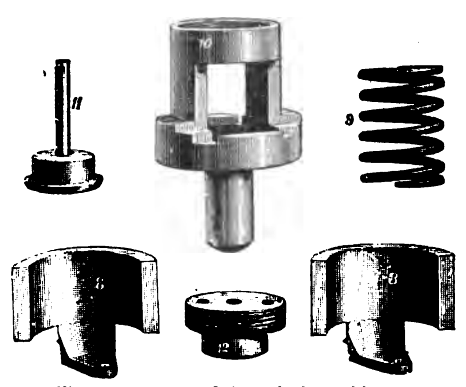


Fig. 70 à 75. — Pièces de la turbine.

expériences pour être construite convenablement, est l'arbre portant la roue à aubes. En raison des vitesses considérables de rotation obtenues, on pouvait craindre de très graves inconvénients dus à la force centrifuge développée. En effet, une formule simple permet de se rendre compte qu'une masse de 1 gramme placée à la périphérie d'un disque de 16 centimètres de diamètre tournant à 24 000 tours par minute, est sollicitée par une force centrifuge égale à 50 kilogrammes. D'un autre côté, le centrage par-

fait de la roue est presque impossible. Quelque précaution que l'on prenne dans la construction, et souvent à cause des défauts de la matière, il est impossible d'obtenir que le centre de gravité du disque vienne coïncider avec l'axe géométrique de l'arbre et que son plan de symétrie lui soit perpendiculaire. Avec des arbres rigides, il aurait pu se produire, de ce chef, des échauffements dans les coussinets et même des ruptures de pièce. M. de Laval a très ingénieusement tourné cette difficulté en utilisant les propriétés gyrostatiques des corps et en montant sa turbine sur un arbre très mince, et par suite flexible.

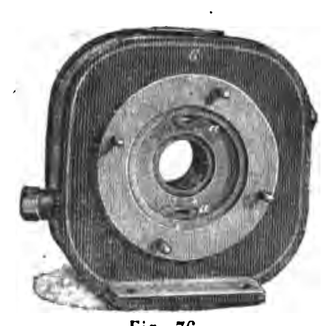


Fig. 76.
Flasque de la turbine de Laval.

Si l'on fait tourner un corps qui a un plan de symétrie autour d'un axe maintenu à ses extrémités et passant par son centre de gravité, ce corps tendra, à mesure que la vitesse augmente, à tourner autour de son axe principal d'inertie qui est la ligne perpendiculaire au plan et passant par le centre de gravité. L'axe physique étant flexible, se déformera de la quantité nécessaire pour lui permettre cette orientation. La position du disque sur l'arbre n'a pas d'influence; ce disque peut être placé au milieu de l'axe, à un tiers ou un quart de distance d'un de ses points fixes, le phénomène se reproduira de la même façon, le mouvement vibratoire de l'arbre seul changera.

Si l'on fait, au contraire, tourner ce disque autour d'un axe flexible perpendiculaire à son plan de symétrie mais ne passant pas par le centre de gravités, deux cas pourront se présenter : ou bien le disque étant placé entre ses deux points fixes, le centre de gravité tendra à s'en éloigner d'autant plus que la vitesse de rotation sera plus grande, ou bien, le disque ne se trouvant pas au milieu de l'arbre, celui-ci commencera par fléchir, mais alors le plan du disque se trouvant incliné par rapport à l'axe géométrique, le disque tendra, à mesure que la vitesse augmentera, à se placer perpendiculairement à cet axe, et à ramener par conséquent l'arbre dans la ligne des paliers supposés rigides.

On assistera donc au curieux phénomène suivant : l'arbre flexible avec disque excentrique monté à une certaine distance

entre les paliers, étant mis en mouvement, commence par fléchir d'une façon très visible en décrivant un arc, et finit par se redresser spontanément à partir d'un certain nombre de tours par seconde. Les frottements qui se sont produits au début, dans les coussinets, en opposant une résistance sensible à la rotation, disparaissent en même temps ; les vibrations transmises à la masse sont insignifiantes.

Il a donc été tenu compte, dans la construction, de tous ces phénomènes étudiés avec soin ; les arbres, dans les turbo-moteurs de Laval, sont en acier, et leur diamètre est extrêmement faible. Les portées sont très longues ; elles reposent dans des coussinets en bronze avec interposition de métal antifriction, et un graissage modéré mais continu permet d'éviter tout grippement.

En résumé, si l'on veut comparer ce genre de moteur avec les autres systèmes de machines à grande vitesse, on reconnaîtra qu'il présente les avantages suivants :

1° Dans toute machine rotative travaillant à grande vitesse, l'usure des pièces soumises à frottement amène rapidement du jeu entre ces pièces. L'étanchéité étant, pour toutes ces machines, une condition absolue d'économie et cette étanchéité disparaissant rapidement, la consommation de vapeur, qui, au début, reste quelquefois inférieure à 30 ou 40 kilogrammes par cheval, atteint très rapidement des chiffres énormes.

Dans la turbine de Laval, au contraire, la force vive de la vapeur agissant seule, et non sa pression, il y a toujours, par construction, entre la roue et son enveloppe un jeu de 2 à 5 millimètres. Aucune pièce n'est donc soumise à des frottements, et la consommation reste constamment la même, quel que soit le temps de fonctionnement de l'appareil.

2° Par principe, la vapeur a la même pression sur les deux faces de la roue. Elle suit donc tout naturellement le chemin que lui offrent les canaux des aubes, si celles-ci ont bien le profil convenable, et le passage direct à l'échappement est évidemment nul, aussi bien au moment de la livraison de la machine qu'après un temps quelconque de fontionnement.

On vérifie bien cette propriété dans la pratique. Il suffit, en effet, d'ouvrir un des purgeurs de la boîte du moteur, côté échappement, pour constater que cette vapeur sort sans vitesse, et c'est là la raison pour laquelle, comme nous venons de le dire, on

peut laisser entre la roue et la boîte-enveloppe un jeu très appréciable qui supprime tout frottement sur la périphérie de la roue.

3° Les condensations dans la machine sont négligeables, quelle que soit la pression de la vapeur utilisée.

En effet, la vapeur est ramenée par son passage dans les conduits à la pression d'échappement au moment où elle arrive en contact avec la roue. La vapeur à haute pression, et par suite à température élevée, ne se trouve donc jamais en contact avec cette roue qui n'a pas à subir, comme les cylindres des machines à pistons, des alternatives de haute et basse températures, cause essentielle des condensations.

Les conduits peuvent d'ailleurs être mis entièrement à l'abri de l'action refroidissante de l'air, et c'est là le cas de la turbine de Laval, où ils sont absolument noyés dans des épaisseurs relativement considérables de matières.

4° L'utilisation de la vapeur est poussée à sa limite, puisqu'elle passe, dans les conduits, de la pression de la chaudière à la pression de l'atmosphère extérieure. Il en résulte, pour cette machine, une consommation égale à celle des meilleures machines à vapeur, comme le prouvent d'ailleurs les nombreux essais effectués dans les circonstances les plus variées. Le tableau II donne la *consommation par cheval effectif et par heure* pour les différents types de turbines en fonction de la pression d'admission et de celle de l'échappement.

5° La turbine de Laval ne contient plus, comme seul organe en mouvement, qu'une roue tournant librement dans la chambre à vapeur et un train d'engrenage.

Comme l'ont reconnu de nombreux ingénieurs après un examen comparatif consciencieux, le turbo-moteur Laval présente d'incontestables qualités, notamment une très grande simplicité de construction, faibles résistances passives, encombrement très réduit et poids très faible relativement à la puissance développée, vitesse très constante, consommation de vapeur normale, dépense en huile et en chiffons très faible, peu de surveillance, démontage et visite du mécanisme interne facile et rapide, enfin, marche silencieuse, absence complète de trépidations, ce qui permet de l'installer au cœur même des habitations et dans les emplacements les plus exigus. Tel est le bilan des avantages de ce

genre particulier de moteur qui, rappelons le, est maintenant adopté dans presque tous les pays, et a fait tomber toutes les résistances du début dès que l'on a reconnu que, malgré le principe tout nouveau sur lequel il était basé, il pouvait cependant soutenir victorieusement la comparaison avec les meilleurs moteurs à détente et à grande vitesse.

Nous donnerons, encore, deux tableaux, empruntés, ainsi que les détails qui précèdent, à une intéressante brochure sur la turbine Laval, publiée il y a quelques années par M. K. Sosnoswski, ingénieur, qui a vulgarisé l'appareil du savant suédois dans notre pays. Le premier de ces tableaux montre quelle est la quantité de vapeur consommée par cheval effectif développé et par heure, les autres résument les diverses conditions d'établissement et de fonctionnement des turbo-moteurs simples, des turbines-dynamos et des turbines accouplées directement à des alternateurs.

II. — *Consommation de vapeur sèche par cheval effectif et par heure*

Puissance en chevaux	Pression d'admission à la turbine en kilos par cm²				
	6kg	8kg	10kg	12kg	14kg
	1° Échappement à l'air				
10 à 15	26.50	24.10	22.60	21.60	20.80
20	24.80	22.60	21.10	20.20	19.50
30	21.50	19.30	18.00	17.00	16.50
50	20.00	18.00	16.60	16.00	15.00
	2° Échappement au condenseur. Vide 68 c/m.				
20	16.20	15.60	15.00	14.75	14.45
30	12.50	12 00	11.75	11.50	11.25
50	10.20	9.70	9.40	9.00	8.75
100 à 150	8.30	8.40	8.00	7.80	7.70
200 à 225	8.30	7.90	7.50	7.40	7.30
300 à 350	7.46	7.05	6.75	6.65	6.40

N. B. — Pour pouvoir comparer les chiffres ci-dessus représentant la consommation par chevaux *effectifs* aux consommations de moteurs à vapeur ordinaires qui sont données toujours

par chevaux *indiqués*, il faut tenir compte du rendement de ces derniers.

Exemple : La consommation d'un moteur économique à piston d'une puissance de 300 chevaux à 8 kilos de pression d'admission est de 6k,70 à 7k,00 par cheval indiqué, ce qui correspond, en admettant un rendement de 85 0/0, à une consommation de 7k,88 à 8k,24 par cheval effectif. Ce sont ces derniers chiffres qui seuls sont comparables aux chiffres de notre tableau où sont consignées les consommations par chevaux effectifs. Or, la consommation d'une turbine de 300 chevaux est sensiblement inférieure.

III. — *Turbines-Moteurs.*

Type	Emplacement total en m/m			Poulie		Poids en kilogs	Nombre de tours de l'arbre de commande
	Longueur	Largeur	Hauteur	Diamètre	Largeur		
5 chevaux	825	420	830	160	80	150	3000
10 —	900	530	1000	200	100	225	2400
15 —	950	550	1000	200	115	260	2400
20 —	1075	720	1160	240	130	420	2000
30 —	1440	720	1160	240	155	580	2000
				A deux poulies et deux arbres moteurs			
50 —	2080	930	1500	320	170	1570	1500
75 —	2140	915	1500	320	270	1870	1500
100 à 150	2610	1250	1750	400	280	2100	1365
200 à 225	3300	1590	1780	620	420	4700	900
300 à 350	4110	1910	2150	700	520	7905	800

IV. — *Turbines-Dynamos.*

TYPE de la Turbine employée	Puissance en watts	Emplacement total en m/m			Poids en kilog	Nombre de tours de la dynamo
		Longueur	Largeur	Hauteur		
5 chevaux	3000	1300	570	830	360	3000
10 —	6110	1520	640	1000	590	2400
15 —	9420	1660	740	1000	700	2400
20 —	12580	1800	860	1160	1000	2200
30 —	19140	1920	920	1160	1450	2200
50 —	32250	2 induits: 2115	1430	1500	3060	1500
75 —	48000	2 induits: 2610	1585	1500	3100	1500
150 —	97000	2 induits: 2900	1700	1650	5000	1365
225 —	147000	2 induits: 3500	1590	1820	8500	900
350 —	232000	2 induits: 4160	1910	2380	11500	800

N. B. — D'après ce tableau, on voit qu'au point de vue du poids la turbine Laval constitue un moteur léger, le type de 5 chevaux posant 30 kilos par cheval, celui de 10 chevaux 22 kil. 5, celui de 30 chevaux 19 kil., celui de 100 chevaux 18 kil. et celui de 300 chevaux 16 kil.

V. — *Turbines-Alternateurs.*

Type de la turbine employée	Puissance absorbée non compris l'excitation en chevaux	Puissance disponible aux bornes en Kw. pour cos φ moyen = 0,89	Poids approximatif en kilogrammes	Nombre de tours par minute
100 chev.	100	66	4.800	1.500
150 —	150	100	6.200	1.000
200 —	200	132	7.500	1.000
300 —	300	200	10.000	750

Améliorations récentes réalisées dans la construction des turbines de Laval. — On peut signaler de nombreux perfectionnements apportés à la turbine de Laval dont les uns, tout en augmentant la solidité de sa construction, rendent son fonctionnement plus sûr et régulier, en même temps qu'ils facilitent sa conduite et sa surveillance, et dont les autres améliorent son rendement.

Ajutages automatiques réglables. — Des pistons autorégulateurs agissent par le fait de la vapeur sur la fermeture ou l'ouverture des ajutages et permettent, grâce aux variations de la pression dans la boite à vapeur, de maintenir la pression sensiblement constante quelle que soit la puissance demandée à la turbine. Les aubes réceptrices de la vapeur sont montées sur le disque d'une façon amovible. Les opérations de montage et de démontage en sont très simplifiées.

La garniture étanche pour arbre flexible obturateur du vide consiste en un coussinet spécial pouvant suivre, sans le gêner en quoi que ce soit, tous les mouvements de l'arbre flexible sur lequel est monté, tout en fermant toute communication entre l'intérieur de la machine et l'extérieur. Les engrenages en bronze sont remplacés par des roues en acier présentant de sérieux avantages sur les premières. L'emploi des disques pleins avec arbre en deux pièces permet de réaliser des vitesses périphériques plus en rapport avec les vitesses de la vapeur et de réaliser par conséquent des rendements plus élevés. Les résultats obtenus avec ce type sont consignés dans l'extrait du procès-verbal ci-après des essais exécutés

à la station électrique de Vendam sur deux turbines-alternateurs triphasés de 300 chevaux.

Tableau VI

Essais de consommation d'une turbine alternateur de 200 kilowatts

Pression de la vapeur à l'admission en kilos par centimètre carré	Vide dans la boite d'échappement de la turbine en centimètres de mercure	Nombre d'ajutages ouverts	Nombre de tours des 2 arbres moteurs par minute	Puissance développée en kilowatts	Consommation de vapeur par kilowatt-heure	
					Vapeur contenant 5 0/0 d'humidité	Vapeur sèche
12,17	68,3	7	749	226,6	10,54	10,13
12,12	69,7	6	748	192,5	10,74	10,41
12,3	70,3	5	747,5	161,2	10,84	10,51
11,9	70	4	748,5	117,9	11,53	11,17
12,07	69,9	3	747,7	82,1	12,51	12,16
12,4	70,6	2	749	44,7	15,76	15,25

Un système de distributeur constitué par des ajutages obturables individuellement, et dont les sections de sortie sont cependant tellement contiguës qu'il ne résulte de l'ouverture simultanée de ces ajutages qu'un flux de vapeur unique, permet une meilleure utilisation de l'énergie de la vapeur, qui se traduit par une économie sensible sur les consommations ordinaires.

Des dispositifs et types spéciaux ont été imaginés pour utiliser des hautes pressions et de la vapeur surchauffée. Les essais sur une turbine de 300 chevaux installée dans la Papeterie de MM. Ignace Spiro et fils, à Krummau, marchant avec la vapeur à très faible surchauffe sont consignés dans le tableau ci-après.

Tableau VII

Essais de consommation d'une turbine de Laval de 300 chevaux.

Pression de la vapeur à l'admission en kilos par c/m carré	Température de la vapeur à la soupape d'admission en degrés centigr.	Vide dans la boîte d'échappement de la turbine en c/m de mercure	Nombre d'ajutages ouverts	Nombre de tours des 2 arbres moteurs par minute	Puissance développée en chevaux effectifs	Consommation de vapeur par cheval effectif et par heure
8,6	190	68,5	7	750	297,8	7,05
8,55	190	69,1	6	760	252,6	7,12
8,6	190	69,9	5	753	211,3	7.00
8,5	188	70,1	4	750	165,0	7,27
8,5	187	70,9	3	762	120,5	7,47
8,5	187	71,5	2	762	74,5	8,05
8,5	188	71,7	1	762	30,8	9,75

Avec une surchauffe plus élevée on obtient des résultats encore meilleurs, comme le prouvent les essais exécutés sur la turbine motrice de 300 chevaux installée à la manufacture de MM. Krusche et Ender à Pabianice.

Les essais exécutés dans cet établissement en 1900 ont donné les résultats suivants :

								par cheval-effectif
Turbine de	100 chv^x,	7 kg. de pression	sans surchauffe ;			consommation		9.80
—	100	— 15	—	avec	—	60°	—	6.52
—	300	— 15	—	—	—	60°	—	5.32
—	15	— 15	—	—	—	60°	—	16.8

Utilisation des très hautes pressions et surchauffes. — Etant donnée l'analogie des turbines à vapeur avec les turbines hydrauliques, et puisque le rendement de ces dernières atteint et dépasse même 90 0/0, il était tout naturel d'en attendre des rendements très élevés et, en tout cas, beaucoup plus élevés qu'avec des machines à piston. L'étude théorique de la question, dit M. Sosnoswski dans le *Bulletin des Ingénieurs Civils* en 1890 nous a pleinement confirmé dans cette opinion que nous n'avons pas hésité d'émettre il y a près de dix ans, malgré les résultats pratiques relativement peu satisfaisants alors.

« Deux ordres de faits donnaient une apparence de raison aux

critiques du système. D'une part, les déboires éprouvés par tous les moteurs rotatifs qu'on confondait volontiers, et d'une façon générale, avec les turbines, bien qu'il n'y ait entre ces deux appareils qu'une seule analogie : celle du mouvemeut circulaire continu ; d'autre part, les difficultés rencontrées par les premières turbines *de réaction* dont le rendement, du fait même de leur conception mécanique, diminuait dans des proportions décourageantes au bout d'un certain temps de service. Or, il a appartenu à la turbine de Laval d'amener une réelle réaction

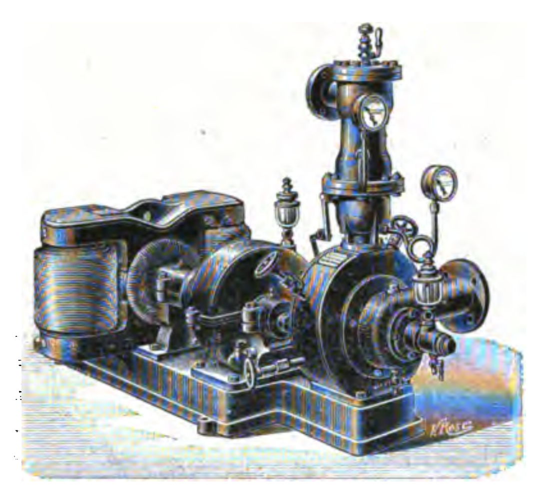


Fig. 77. — Turbine de Laval accouplée à une dynamo.

dans cette voie. En effet, plus on étudiait cette machine, plus on voyait l'avenir qui lui était réservé, puisqu'on pouvait parvenir, comme nous le disions à cette époque à utiliser 50 et 75 0/0 de la puissance théorique de la vapeur, tandis que dans les meilleures machines alternatives on n'obtient que le tiers ou le quart du rendement théorique.

« Nous n'avons envisagé au début que l'utilisation des pressions élevées et la part, qu'on pourrait en tirer un jour.

« On admet aujourd'hui d'une façon courante des pressions de 10 à 15 kilogrammes.

« Avec de la vapeur saturée sèche à ces pressions on réalise dans les turbines des consommations de 7 à 8 kilogrammes par cheval effectif heure, comme le prouvent les essais nombreux effectués depuis cette époque.

« Du côté de la turbine Laval rien ne s'oppose à ce que ces pressions soient portées plus haut.

« Avec de la vapeur surchauffée de 20 à 50° C. on peut réaliser des consommations de 7 kilogrammes à $6^k,5$ par cheval effectif heure.

« Pour se rendre compte de ce qu'on peut attendre de la haute surchauffe nous ne pouvons mieux faire que de citer, d'après le *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* l'extrait du compte rendu des expériences effectuées en 1900 au laboratoire de l'Ecole supérieure technique de Dresde, par MM. les professeurs Lewicki et Hubler sur une turbine de Laval de 30 chevaux. Dans les cas extrêmes, la surchauffe fut poussée jusqu'à la température de 500 degrés à une pression de 6 atmosphères à la turbine. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous. »

Tableau VIII

Essai au frein à demi charge et à pleine charge. Pression absolue de la vapeur à l'admission 7 atmosphères, nombre de tours par minute 2000. Marche sans condensation

	Demi-charge		Pleine charge	
	vapeur saturée	Vapeur surchauffée	Vapeur saturée	Vapeur surchauffée
Température de la vapeur en degrés centigrades	164°	460°	164°	500°
Puissance au frein en chevaux	21,4	24,5	44,1	51,9
Consommation de vapeur par cheval-heure en kilogrammes	21,6	14,1	17,7	11,5
Consommation de chaleur (contenue dans la vapeur) par cheval-heure en calories	14160	11270	11610	9390
Température de sortie de la vapeur en degrés centigrades	100	309	100	343
Chaleur à récupérer par cheval-heure en calories	—	1415	—	1340
Economie réalisée sur l'emploi de vapeur saturée par la récupération de la vapeur évacuée jusqu'à retour à l'état de saturation p. 0/0.	—	—	—	31

Il ressort de l'examen de ces chiffres, qu'avec une surchauffe croissante, non seulement la consommation de vapeur, mais aussi celle de la chaleur diminue, alors que le travail au frein augmente. On peut conclure de ces résultats que le travail à vide est diminué par suite du faible frottement de la roue dans la vapeur

de sortie surchauffée, et qu'il y a accroissement d'énergie du jet, par unité de poids de vapeur. Cette énergie croît, comme on le sait, avec le carré de la vitesse du fluide, laquelle est proportionnelle à la quantité de vapeur passant par l'ajutage dans l'unité de temps. A cette augmentation de l'énergie du fluide correspond, il est vrai, un affaiblissement de l'effet dit hydraulique ; celui-ci, pour une vitesse de vapeur croissante (dans le dernier essai du tableau, par exemple, la vitesse de la vapeur dans l'ajutage croît, suivant que la vapeur est saturée ou surchauffée, de 807 à 1.046 mètres par seconde), et pour une vitesse périphérique de la roue constante, doit diminuer par suite de l'accroissement de perte par choc. Cependant cette diminution de l'effet hydraulique n'est, comme le montrent les essais, que d'une importance secondaire, car, par suite de l'augmentation du choc d'entrée, la température de la vapeur dans la chambre de sortie se trouve relevée, et ce phénomène abaisse la résistance de la roue à vide et augmente en même temps l'effet mécanique. On voit que l'emploi d'une haute surchauffe produit une augmentation d'effet mécanique l'emportant sur la diminution de l'effet hydraulique.

L'expérience a montré clairement que, à une vitesse de roue décroissante et à une vitesse d'admission de vapeur constante, la température de sortie de vapeur croît d'une façon très nette. Cet accroissement ne peut être dû qu'à une augmentation du choc contre les aubes de la roue. D'ailleurs la température de sortie de la vapeur, par suite du choc et vraisemblablement aussi par suite du frottement contre les parois de l'ajutage, reste supérieure à la température finale correspondant à une détente adiabatique.

En résumé, la turbine à vapeur, au point de vue thermodynamique, se rapproche de l'idéal plus que tout autre moteur à vapeur. Elle est presque entièrement soustraite à la plus importante des pertes extra-thermodynamiques des machines à vapeur ordinaires (action de parois). Elle se prête d'une façon toute spéciale à l'utilisation de très hautes pressions qui sont destinées à améliorer le rendement des moteurs à vapeur ainsi qu'à l'emploi de la vapeur surchauffée ; enfin on peut penser que l'avenir de ce genre de turbine, en dehors de ses applications toutes spéciales, est surtout et avant tout dans l'utilisation de la vapeur surchauffée.

Turbines compound. — Pour utiliser l'énergie restant à la sortie d'un disque, on peut recourir à un dispositif dit compound ou à disques multiples et qui consiste à faire diriger le fluide à sa sortie de la première turbine dans une ou plusieurs autres ayant

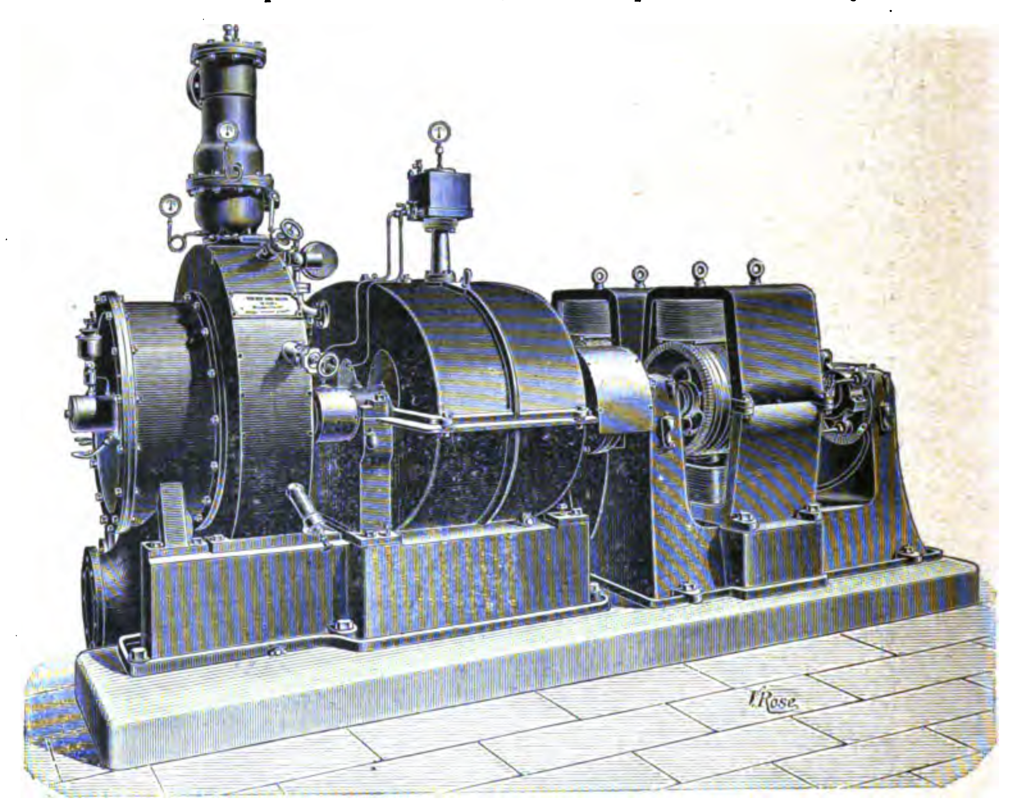


Fig. 78. — Turbine de Laval actionnant deux dynamos à courant continu.

la même vitesse linéaire. C'est ainsi que sont constituées les turbines à disques multiples de Laval-Breguet. Grâce à la multiplicité des disques, la vitesse angulaire a pu être suffisamment réduite pour permettre l'accouplement direct de l'arbre moteur avec des alternateurs ou des dynamos.

Les turbines de la série normale ont, en effet, les caractéristiques ci-après

Type de	600	chevaux effectifs :	vitesse	3.000	tours	par minute
—	1 000	—	—	2.400 à 3.000	—	—
—	1.500	—	—	1.900	—	—
—	2.200	—	—	1.500	—	—

L'unique organe en mouvement se compose d'un arbre rigide sur lequel sont montés les disques en acier forgé, à la périphérie desquels sont fixées les aubes réceptrices.

Aux propriétés générales des turbines à disques multiples bien connues, que nous rappelons : minimum d'encombrement, fondations très réduites, marche absolument silencieuse, simplicité de mise en marche et facilité de conduite, entretien à peu près nul, constance absolue du couple moteur, facilité de couplage en parallèle des alternateurs commandés par ces moteurs, ces turbines joignent un certain nombre d'avantages tels que : régulation parfaite permettant la décharge totale et brusque de la machine sans crainte d'emballement et la consommation de vapeur très réduite. Cette consommation étant essentiellement fonction de la pression et du degré de surchauffe varie dans chaque application. Cependant, pour fixer les idées, on peut d'ores et déjà indiquer qu'elle est, en général, comprise entre $4^{kg},500$ et 6 kilogrammes par cheval effectif et par heure.

CHAPITRE IX

La turbine à vapeur Parsons.

La première turbine à vapeur Parsons fut construite en 1884 ; elle faisait 18.000 révolutions par minute et développait environ 6 chevaux-vapeur. Elle attira la curiosité générale en raison de la nouveauté de ses dispositions et donna lieu à de nombreuses discussions dans les journaux techniques comme au sein des sociétés scientifiques. On lui reprochait surtout sa complication, sa vitesse exagérée et sa consommation élevée de vapeur. L'inventeur se remit donc à l'œuvre et il produisit successivement des unités de plus en plus puissantes, dont les dispositions mécaniques et la consommation étaient améliorées. Le deuxième spécimen fut mis à bord d'un navire l'*Earl-Percy* pour alimenter 60 lampes à incandescence et le résultat fut satisfaisant. Dès lors, l'élan était donné : le turbo-moteur ne fut plus considéré comme un simple appareil de laboratoire, mais comme un nouveau système de moteur à vapeur à grande vitesse susceptible de rendre les meilleurs services dans une foule d'applications modernes.

Mais où l'attention universelle se porta vers la machine Parsons, ce fut lorsqu'on apprit en 1897, par les publications techniques, qu'un bateau muni d'une turbine à vapeur de ce système, avait atteint une vitesse de 32 nœuds, soit 60 kilomètres à l'heure, et même, par instants, 34 nœuds 1/2 (64 kilomètres) vitesses extraordinaires qui laissaient loin derrières elles celles des navires réputés jusque-là comme les plus rapides. Le bateau la *Turbinia* mit donc en vedette la création de l'ingénieur Parsons, et désormais les qualités du turbo-moteur longtemps discutées, durent être admises : bien ou mal, l'appareil fonctionnait, le fait est indéniable. Les essais se multiplièrent ; des délégations du gouver-

nement anglais et de divers autres gouvernements d'Europe, des représentants de puissantes sociétés de construction navale de divers pays vinrent assister à ces démonstrations. La Société d'études qui avait construit le yacht la *Turbinia* se transforma en une puissante compagnie au capital de douze millions et demi, pour acquérir les brevets Parsons spéciaux à la propulsion des navires et les exploiter.

Pour donner une idée du développement rapide qu'ont pris les applications de turbines à vapeur, il suffit de donner quelques chiffres :

En 1884, les turbines à vapeur Parsons ont été appliquées pour la première fois à la conduite des dynamos.

En 1890, la puissance installée représentait déjà 5.000 chevaux répartis sur des unités de 4 à 120 chevaux-vapeur.

En 1896, cette puissance atteignait 40.000 chevaux, les plus fortes unités étant de 600 chevaux.

En 1902, la turbine Parsons est représentée en Angleterre seulement par 200.000 chevaux, la machine la plus puissante étant de 3.000 chevaux.

Sur le continent européen, la Société Brown-Boveri et C°, concessionnaire des brevets Parsons depuis 1900, a fourni des groupes représentant une puissance totale de 35.000 chevaux dont plusieurs unités de 3.000 et 5.000 chevaux.

Aux Etats-Unis, la Compagnie Westinghouse a livré de son côté un certain nombre de groupes de puissances diverses, et elle vient d'obtenir la commande de 10 turbo-alternateurs système Parsons de 5.000 chevaux chacun, destinés à actionner le Métropolitain de Londres.

L'ensemble des turbo-dynamos du type Parsons représente aujourd'hui une puissance totale de 300.000 chevaux.

Nous n'avons pas l intention de refaire ici la théorie de la turbine à vapeur et nous nous bornerons à donner ci-après une description succincte de la turbine à vapeur, système Parsons, ainsi que des résultats pratiques qu'elle permet d'obtenir.

Cette machine se compose d'un grand nombre de turbines montées sur le même axe et placées en cascade, de sorte que la vapeur qui entre par une extrémité en sort par l'autre, après avoir parcouru successivement tous les éléments de la turbine.

A cet effet, les aubes directrices sont disposées en couronne

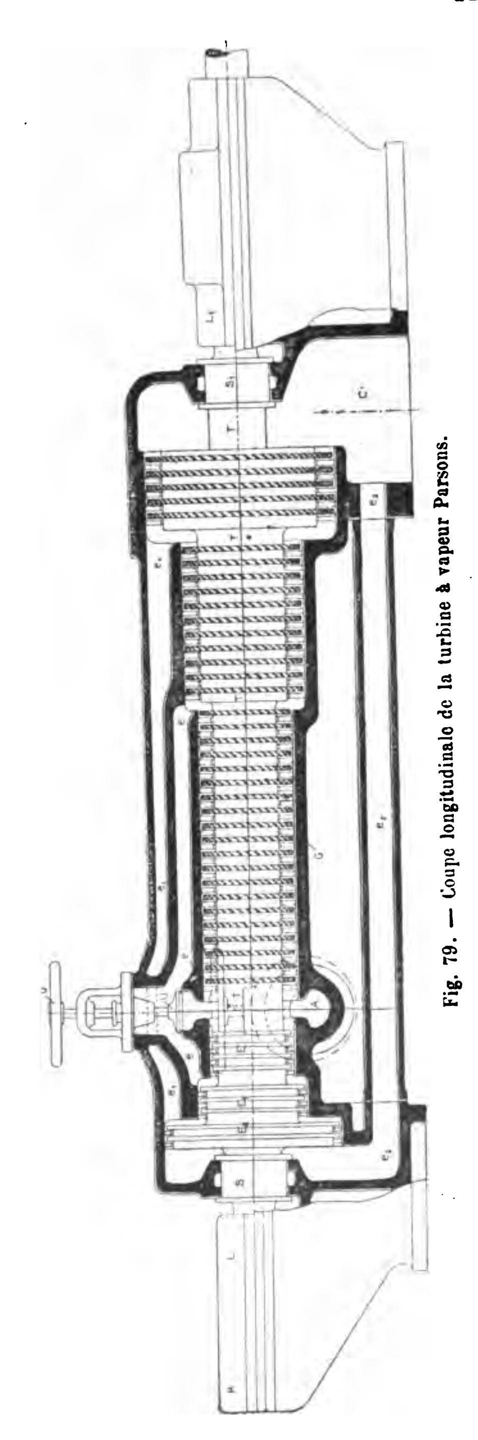


Fig. 79. — Coupe longitudinale de la turbine à vapeur Parsons.

sur la face intérieure d'un corps cylindrique creux et interposées entre les couronnes d'aubes fixées sur le cylindre moteur qui tourne dans l'intérieur du corps cylindrique (fig. 79). La vapeur parcourt, par conséquent, une ligne sinueuse parallèle aux génératrices du cylindre.

Il résulte de cette disposition que la vapeur ne se détend pas brusquement, mais qu'elle passe successivement de la pression initiale à l'entrée, à la pression d'échappement qu'on aura, par conséquent, intérêt à maintenir aussi proche que possible du vide absolu. L'action de la force vive de la vapeur se trouve ainsi répartie sur un très grand nombre d'aubes, et la pression exercée sur chacune d'elles est une fraction infiniment petite du travail total.

La vapeur se détendant au fur et à mesure qu'elle avance dans la machine, son volume augmente ; aussi le cylindre présente-t-il en général, trois parties de différent diamètre et, dans chacune de ces parties, la hauteur des ailettes va en croissant progressivement, d'une couronne à la suivante, dans le sens du mouvement de la vapeur.

Afin d'éviter la poussée longitudinale, le cylindre moteur porte à son extrémité opposée à l'admission, trois pistons, de

diamètres correspondant à ceux de la turbine, et dont la face interne est en communication directe avec les trois étages d'ailettes, de façon à être soumise à la même pression mais en sens inverse. Ces pistons portent, sur leur pourtour, des nervures qui tournent librement dans des rainures correspondantes pratiquées dans l'enveloppe ; cette disposition est d'une étanchéité parfaite et a été également adoptée pour les garnitures, supprimant ainsi les presse-étoupes qui réclament tant de soins.

Si l'on veut se rendre compte de l'action dynamique de la vapeur à l'intérieur de la machine, il faut considérer une roue prise isolément. La différence de pression existant sur ses deux faces oblige la vapeur à se précipiter à travers les orifices des aubes et à traverser, d'abord la couronne fixe, puis le disque mobile. La vitesse dont sont animées les molécules du fluide croît rapidement avec cette différence de pression, mais cette vitesse n'est pas constante dans tous les points de la veine, non plus que la pres-

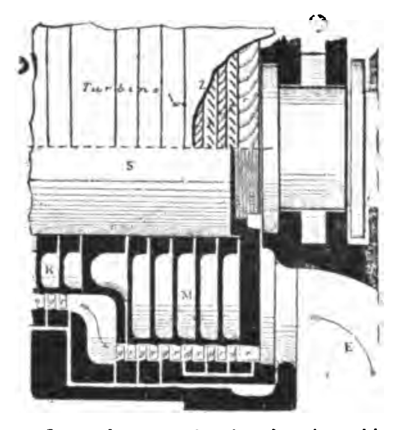


Fig. 8?. — Coupe des roues à aubes dans la turbine Parsons.

sion. La vitesse dépend essentiellement des pressions d'amont et d'aval ; il existe bien dans tous les cas, une section contractée, mais la pression en cette section n'est pas constamment égale à celle du milieu d'aval. Elle ne lui est supérieure que dans le cas où la pression de ce milieu est supérieure à la moitié environ de celle du milieu d'amont.

Cette condition est réalisée dans la turbine Parsons par l'addition d'une série de roues à aubes placées à la suite les unes des

autres, la chute de pression qui se produit pour chacune d'elles n'étant plus qu'une faible fraction de la pression du milieu d'amont. Par cette disposition de chute en cascade, on est assuré d'obtenir le minimum de pression à chaque section contractée, chose indispensable puisque à ce minimum de pression correspond, comme l'indique la théorie, le maximum de vitesse.

Pour utiliser convenablement ce maximum de vitesse, il faut que la section contractée soit précisément placée à l'entrée des aubes mobiles de façon que le jet vienne les frapper avec la rapidité la plus grande ; c'est ce que nous trouvons encore réalisé dans la turbine Parsons, où les aubes fixes vont en s'étranglant jusqu'au débouché dans les aubes mobiles. La vapeur se détend sensiblement sans variation de chaleur, l'écoulement s'effectuant en un temps très court, qui ne dépasse pas 1/47 de seconde pour la traversée d'un modèle de 500 chevaux ; elle se condense en partie mais dans toute sa masse, et la plus grande cause de perte dans les machines ordinaires, la condensation au contact des parois du cylindre est évitée.

On n'a pas tardé à reconnaître que cette disposition était insuffisante, la vapeur n'ayant pas de détente et le volume introduit dans le turbo-moteur n'allant pas croissant d'un bout à l'autre du cylindre comme le voudrait la théorie. Aussi M. Parsons n'a-t-il pas tardé à établir ses turbines avec deux ou trois compartiments de section croissante et appropriée au diamètre des turbines. Dans ces machines dites compound ou triples, chaque compartiment peut être assimilé à un cylindre d'une machine compound ou à triple expansion. La détente s'opère d'une façon plus rationnelle, et le rendement est amélioré.

Dans les modèles actuels de toutes puissances, l'appareil se compose essentiellement d'un cylindre ou boîte horizontale fixe, unique, divisé en deux ou trois compartiments, comme il vient d'être dit. Ce cylindre porte, sur sa paroi interne, des séries concentriques de petites aubes dirigées vers l'axe. Dans les espaces annulaires séparant des séries d'aubes directrices fixes sont disposés des disques fixés sur l'arbre central, lesquels disques portent également des aubes de forme déterminée. L'arbre est supporté par des coussinets spéciaux à chaque extrémité du cylindre et le jeu entre les aubes fixes et les disques tournants est très faible.

La vapeur arrivant de la chaudière est admise au cylindre par

une valve commandée par un volant : elle se répand parallèlement à l'axe au travers des aubes en entraînant celles qui sont mobiles, c'est-à dire l'arbre lui-même, tout en se détendant en passant d'un compartiment à l'autre, et s'échappant finalement son travail accompli par l'autre extrémité à une pression voisine de la pression atmosphérique. Pour éviter la pression latérale à laquelle donnerait lieu la réaction de la vapeur, l'arbre est prolongé du côté de l'entrée et se développe en forme de pistons entaillés, constituant une série de dents coniques minces, qui tournent sans

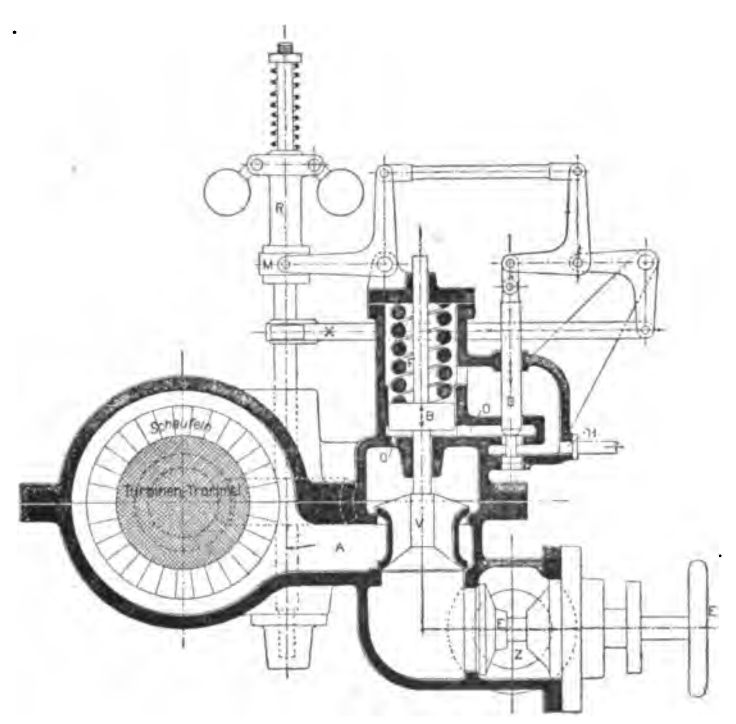


Fig. 81. — Régulateur de la turbine à vapeur Parsons (Brown-Boveri).

contact dans des logements correspondants. Chacun de ces pistons est en communication par sa face antérieure avec le cylindre qui lui correspond en diamètre, de telle sorte que l'équilibre de pression est assuré.

Les vitesses auxquelles tourne le turbo-moteur Parsons sont élevées et peuvent atteindre 10.000 tours par minute ; on conçoit qu'à ces allures rapides, il est nécessaire d'avoir un graissage auto-

matique parfait et une absence complète de toute vibration dans les parties frottantes. Cette difficulté a été surmontée par le constructeur : Le graissage est assuré au moyen d'une circulation d'huile qui baigne constamment et renouvelle les surfaces en contact. Cette huile, centralisée dans un réservoir, est aspirée au moyen d'une petite pompe à air ou d'un ventilateur dans une colonne montante, par l'intermédiaire d'un tuyau. A l'extrémité de l'arbre du moteur, est fixée une vis à pas large, qui tourne avec lui et plonge dans l'huile de la colonne montante dont le niveau est plus élevé. Elle agit comme une vis d'Archimède et force l'huile à pénétrer entre l'axe et ses coussinets de gauche, en la poussant jusqu'à l'extrémité des parties frottantes d'où elle retombe dans le réservoir.

Un troisième tuyau part aussi de la colonne montante et se rend aux coussinets de l'extrémité de droite. Une, partie du liquide retourne de là au réservoir central, l'autre traverse l'axe creux de la bobine en le refroidissant et revient à son tour au réservoir, après avoir lubrifié les coussinets supportant les extrémités de l'arbre. Cette circulation automatique maintient les surfaces à basse température et elle paraît assez économique, puisque l'huile ne peut s'échapper du circuit fermé qu'elle parcourt.

Les coussinets présentent une disposition particulière pour annuler la poussée, les chocs et les vibrations ; sur l'arbre sont enfilées des rondelles du diamètre des coussinets, un peu plus grand que celui de l'arbre. Chacune de ces rondelles est séparée de sa voisine par un autre disque de diamètre plus faible, et un ressort spiral presse toutes ces rondelles les unes contre les autres. L'axe tourne ainsi dans un coussinet de second ordre, à paroi flexible et mobile, constituée par cet assemblage, grâce auquel toutes vibrations se trouvent éteintes par suite du frottement des rondelles entre elles.

Régulation.— La régularisation de la vitesse est un point d'importance capitale dans ce genre de moteur, et M. Parsons a fait breveter diverses dispositions ayant pour but d'assurer la constance de l'allure, malgré les variations de la charge extérieure. Dans l'une, un soufflet en cuir épais contenait une membrane qui agissait sur l'extrémité de la tige de commande et recevait de l'air par un ventilateur agissant sous l'influence d'une dérivation du courant de la dynamo actionnée par la turbine.

Dans les modèles actuels, la régulation est à la fois mécanique et électrique. La vapeur est admise par une série d'introductions, au moyen de l'ouverture périodique de la valve, laquelle est commandée par un relais en connexion mécanique avec l'arbre. La durée des introductions est contrôlée par un solénoïde monté en dérivation sur la dynamo. La rapidité d'action de ce double régulateur est telle que la charge totale peut être mise ou enlevée sans déterminer une variation de vitesse supérieure à 2 0/0. Dans les grosses machines, il y a en outre un régulateur de sûreté qui fermerait instantanément la valve en cas d'accident.

L'ensemble de la turbine repose, soit sur trois piliers en fonte, soit sur un socle creux.

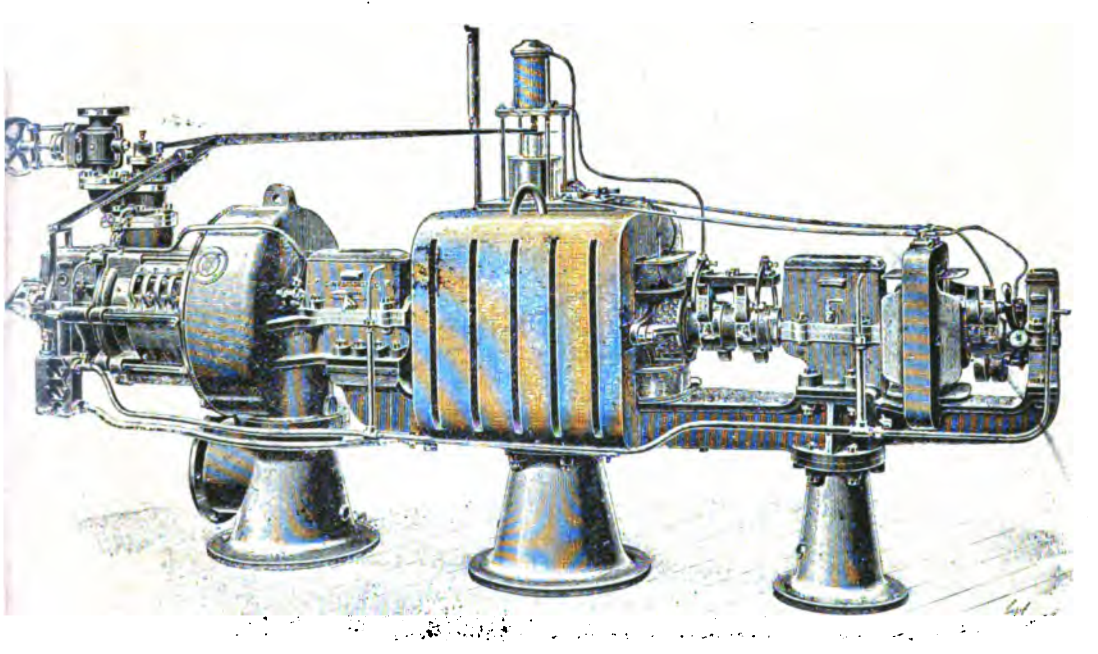


Fig. 82. — Premier type de turbine à vapeur Parsons.

Cette courte description montre bien la simplicité de ce mécanisme. L'huile ne se mélange pas à la vapeur et cette dernière peut être renvoyée à la chaudière après condensation sans exiger un filtrage préalable. D'autre part, cet avantage permet l'emploi de la vapeur surchauffée sans aucun des inconvénients dus au graissage. Ce point présente une certaine importance car la vapeur

surchauffée assure une économie sensible dans la consommation.

Des essais effectués sur un turbo-moteur Brown-Boveri-Parsons en service à la station centrale d'éclairage et de tramways de Linz-Urfahr, en juillet 1902, on peut tirer les conclusions suivantes :

1° Le nombre de tours ne varie que d'environ 2 0/0 entre la marche à vide et la pleine charge ;

2° Lors d'une variation brusque de charge allant du simple au double, de l'effet demandé, le nombre de tours ne s'écarte de la ligne moyenne que de 1 1/2 0/0 environ en plus ou en moins ;

3° Trois à quatre secondes après cette variation brusque de charge de 100 0/0, la machine est déjà revenue à son allure normale.

Dans les paliers, l'arbre porte deux douilles concentriques folles, enfilées à jeu qui tournent dans les coussinets. Le graissage est opéré par inoculation d'huile sous pression qui s'interpose dans le jeu laissé entre les douilles, de telle sorte que l'arbre tourne autour de son axe géométrique. L'huile, après avoir passé dans les coussinets, revient à un réservoir collecteur où elle se refroidit et d'où elle est renvoyée à nouveau dans les coussinets par une pompe de circulation. La consommation d'huile se trouve ainsi réduite à son minimum et elle varie de 0gr6 à 0gr08 par kilowatt heure de la puissance de la machine. Le réservoir, une fois rempli, peut servir plusieurs mois.

La vapeur, qui ne se trouve en aucun point de son parcours en contact avec l'huile, arrive au condenseur exempte de graisse, et on peut ainsi, sans aucune filtration employer l'eau de condensation pour l'alimentation des chaudières.

Comme nous l'avons dit plus haut, la vapeur se détendant progressivement, la vitesse des molécules est relativement faible ; la vitesse de rotation de la turbine est par conséquent également modérée et varie entre 4.000 tours pour des machines de 100 chevaux et 750 tours pour des machines de 10.000 chevaux. On peut donc accoupler directement à l'arbre des turbines, les génératrices électriques qu'elles doivent commander. On supprime ainsi les organes réducteurs de vitesse qui sont une cause de diminution de rendement, sont sujets à usure rapide et exigent un entretien considérable.

Le groupe électrogène Brown-Boveri-Parsons tel qu'il est construit actuellement, constitue un ensemble excessivement robuste,

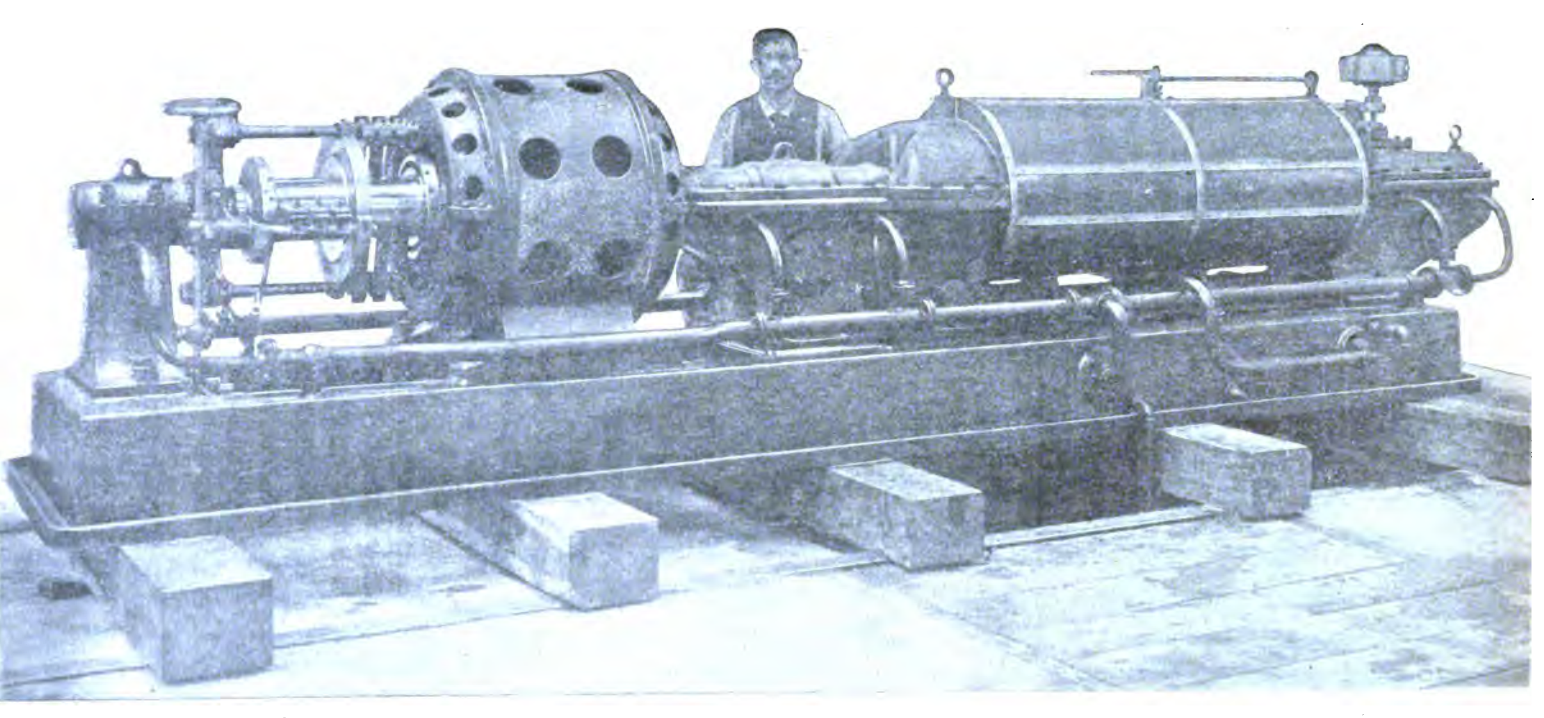


Fig. 83. — Turbo-alternateur Parsons (Brown-Boveri) à accouplement direct.

dans lequel toutes les parties soumises à usure sont réduites au minimum, et qui représente le moins de causes de dérangement possible. Dans la partie motrice, il n'y a, à part les paliers, aucune surface de frottement et la faible vitesse de la vapeur ne provoque aucune usure des ailettes.

L'expérience faite sur des machines en service depuis dix ans, a d'ailleurs démontré que la consommation de vapeur reste sensiblement constante. Comme il n'y a aucun mouvement de va-et-vient, l'équilibrage est excessivement facile et il n'y a à craindre aucune trépidation ; la machine ne nécessite par cela même que peu de fondations.

En raison du poids relativement faible, les frais de transport et de montage sont très réduits, et ce dernier peut se faire très rapidement. Les dimensions restreintes permettent l'emploi de locaux peu étendus. La vapeur n'étant pas en contact avec l'huile, on peut, avec avantage faire usage de la surchauffe qui diminue la consommation dans de très fortes proportions.

Un autre avantage, très appréciable dans les stations centrales électriques, est qu'on n'a pas besoin de réchauffer le cylindre et que la mise en marche s'effectue instantanément, les entraînements d'eau n'ayant pour conséquence qu'un ralentissement momentané de la vitesse.

En ce qui concerne la consommation de vapeur, les essais qui ont été faits jusqu'à ce jour ont démontré que la distance n'est pas plus grande que celle des meilleures machines à vapeur. De plus, comme les pertes organiques sont très minimes, la consommation de vapeur est sensiblement proportionnelle à la charge, ainsi que l'indiquent les nombreux résultats d'essais dont nous donnons un extrait plus bas.

Pour comparer les chiffres qui donnent les poids de vapeur consommée en kilowatts-heure avec la consommation par cheval indiqué telle qu'elle est habituellement donnée par les constructeurs de machines à vapeur, il convient de multiplier la consommation par kilowatt-heure utilisable par le rendement de la génératrice électrique, par le rendement organique d'une machine à vapeur à pistons de puissance équivalente, et par l'équivalent électrique du cheval-vapeur, soit

$$0,91 \times 0,90 \times 0,736 = 0,60$$

Dans la comparaison des essais dont nous donnons les chiffres un peu plus loin, il faut tenir compte que la consommation de vapeur dépend de la pression à l'admission et du vide au condenseur. La surchauffe de la vapeur donne une économie d'environ 1 0/0 par 5° de surchauffe.

On a souvent objecté contre la turbine Parsons, que ses aubes, devaient s'user rapidement sous le courant de vapeur et présenter des érosions. Il n'en est cependant rien car la vitesse calculée de la vapeur n'excède pas 180 mètres par seconde. Elle est d'ailleurs bien inférieure à ce chiffre dans la majeure partie de la machine. En fait, des turbines de 25 chevaux, mises en service en 1887 chez MM. Davidson et marchant 16 heures par jour ont été démontées au bout de douze ans et leurs aubes examinées au microscope ; on n'y a trouvé aucune trace de détérioration ou d'usure. Même constatation a été faite par le professeur Ewing sur une turbine de 500 kilowatts marchant à la pression de $9^{k},85$. Il faut dire que la pression sur chaque aube est extrêmement minime. Ainsi, dans un moteur de 300 kilowatts, comportant 31.073 aubes dont 16.095 mobiles, elle varie de 27 à $32^{r},5$.

Rendement. — La turbine Parsons a eu pendant longtemps la réputation de consommer beaucoup de vapeur. On l'a appelée « stam eater », mangeuse de vapeur. La critique a pu être fondée à l'origine car, comme l'a fait remarquer M. Swinton, il est très difficile d'obtenir une bonne économie de vapeur avec une turbine de faible dimension, et l'on ne pouvait raisonnablement affronter de prime abord les grandes puissances. Aujourd'hui, le problème se présente dans d'autres conditions, et le tableau ci-dessous montre les progrès réalisés.

Puissance en chevaux indiqués	80	240	1920	4500
Date de l'essai	1900	1892	1900	1900
Constructeur	C. A. Parsons			
Lieu d'installation	Exposit.	»	Elberfeld	Francfort
Pression d'admission. . . kg.	9,1	7	9,15	14
Surchauffe	»	légère	+10°	300°
Tours par minute	»	4.800	»	1.360
Consommation de vapeur à pleine charge par cheval-heure . kg.	»	7,7	5,35	4,2

Une comparaison non moins intéressante est celle qui a été faite par la *Westinghouse Air Brake* de New-York, qui a remplacé

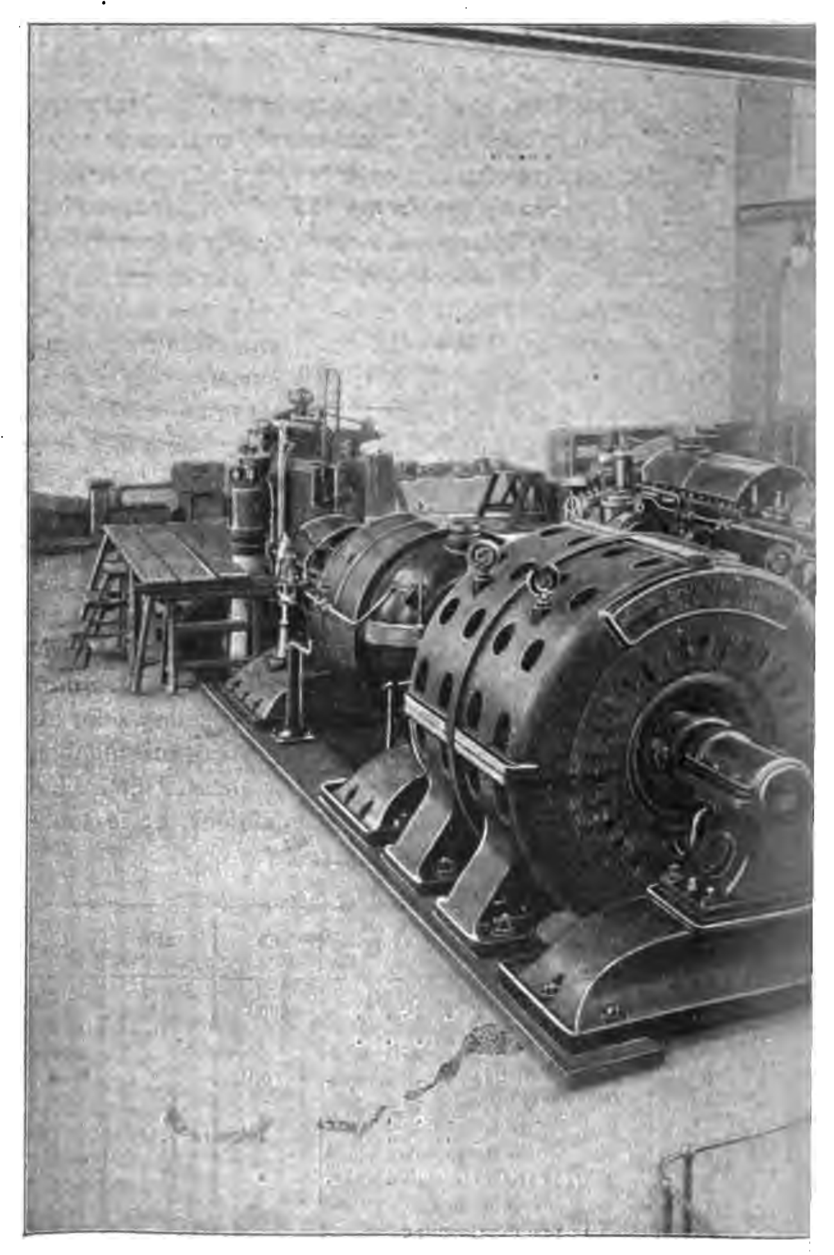
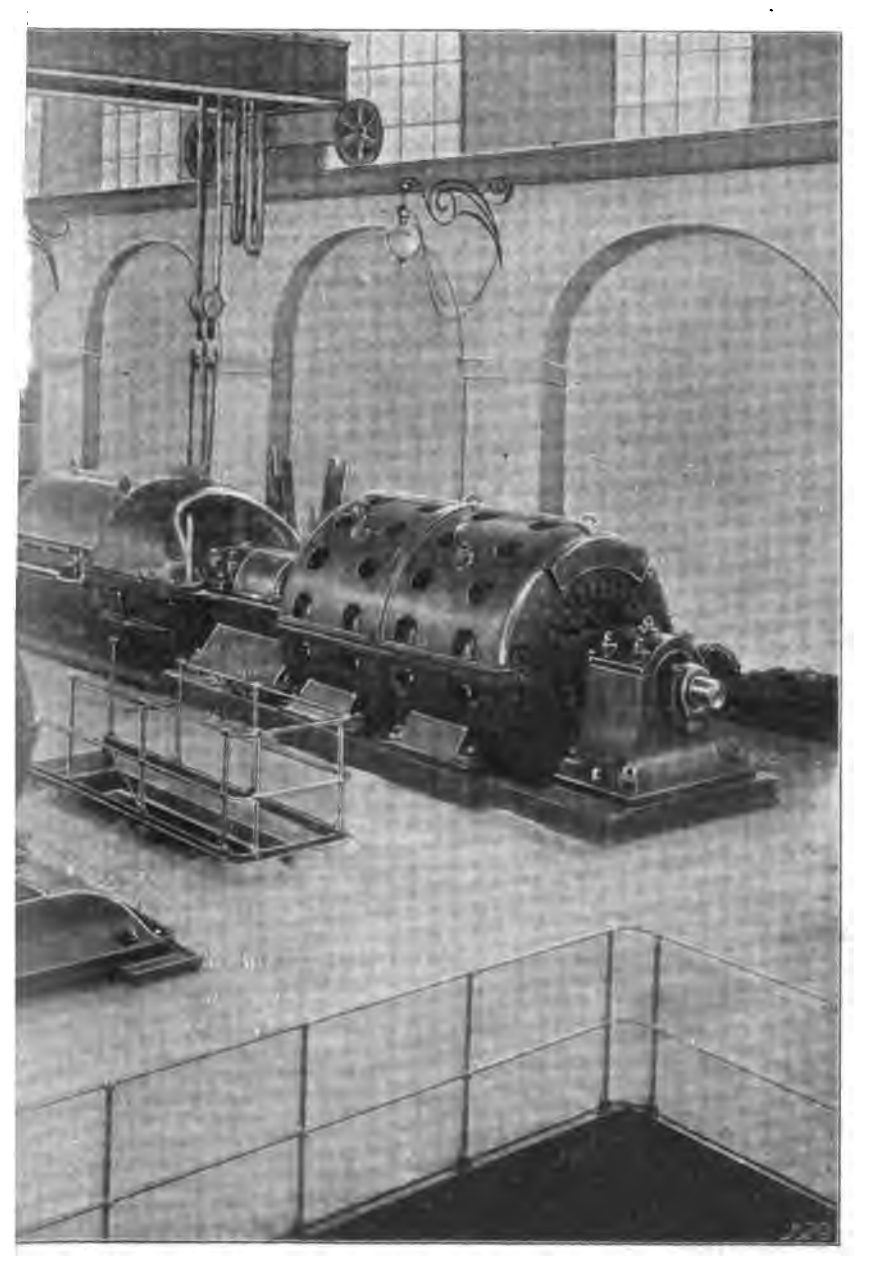


Fig. 84. — Vue d'une station éle

en 1900 ses machines à mouvement alternatif par des groupes électrogènes à turbo-moteurs. Or, en mesurant successivement



que avec turbo-alternateurs Parsons.

les consommations des deux genres de machines, les ingénieurs de cette Compagnie ont pu constater une économie en charbon qui oscille entre 37,7 et 36,4 0/0 au profit des turbines, et de même une économie en eau allant de 29,8 à 41,4 0/0. A la vérité une partie de cette économie provient de ce que l'on a pu supprimer de longues conduites de vapeur, mais c'est là encore un résultat indirect de l'emploi des turbines à vapeur.

Dans toutes les installations fonctionnant aujourd'hui, on a pu

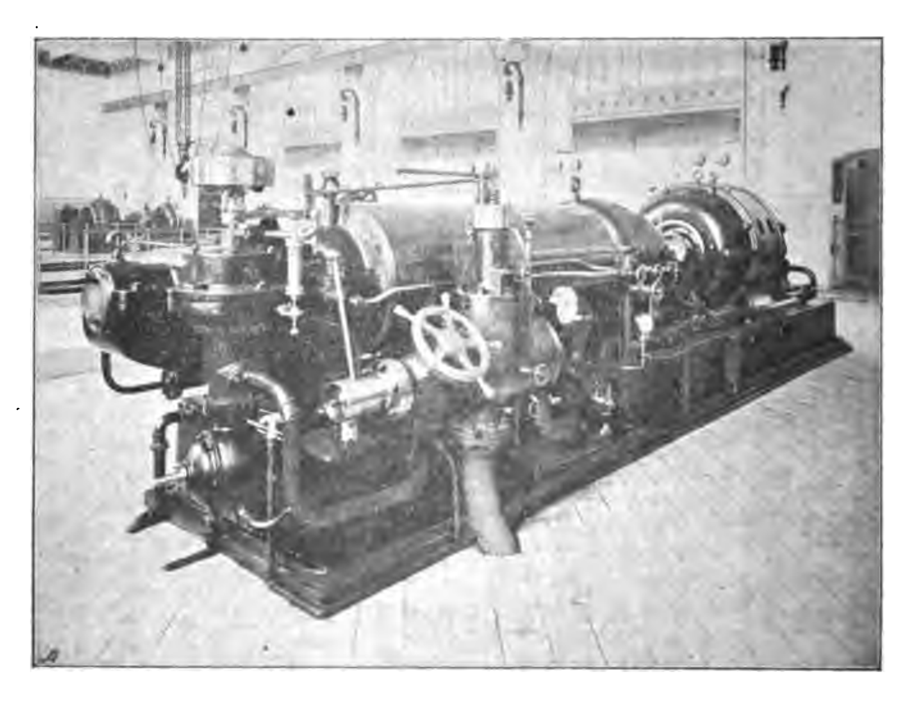


Fig. 85. — Turbo-moteur Parsons de 300 chevaux.

constater que la consommation est faible, mais surtout quand on marche à pleine charge et à forte puissance, tout simplement parce que cet engin réalise de la façon la plus satisfaisante la transformation de la chaleur en énergie, en laissant sortir seulement à 30° et à 53 grammes de pression la vapeur qui y est entrée peu avant à 200° et à $8^k,62$: la détente de la vapeur est utilisée jusqu'aux limites du vide du condenseur.

Turbo-dynamo de 100 kilowatts à courant continu fourni aux Halles et Entrepôts frigorifiques de Berlin. — 1° Essai à

pleine charge de 100 kilowatts : pression à l'admission : $8^k,7$; surchauffe de environ 10° ; marche à condensation.

Vitesse : 3.500 tours par minute.

Consommation de vapeur : $12^k,5$ par kilowatt-heure mesurée aux bornes de la dynamo.

$8^k,35$ par cheval effectif mesuré sur l'arbre de la turbine.

Ce qui correspond à $7^k,1$ par cheval indiqué.

2° Essai à 3/4 de charge=75 kilowatts.

Pression à l'admission : $8^k,9$ (vapeur saturée et sèche) marche à condensation.

Vitesse : 3.500 tours par minute.

Consommation de vapeur : $13^k,5$ par kilowatt-heure mesurée aux bornes de la dynamo.

Soit ; $8^k,9$ par cheval effectif mesuré sur l'arbre de la turbine.

Turbo-alternateur triphasé de 200 kilowatts fournis à la Ville de Coire (Suisse). — Pression à l'admission : $12^k,5$; surchauffe à 250° ; marche à condensation.

	pleine charge — kg.	3/4 charge — kg.	1/2 charge — kg.
Consommation de vapeur par kw. effectif. . .	9,59	10,03	10,77
Consommation de vapeur par cheval effectif sur l'arbre de la turbine .	7,03	7,39	7,9
Consommation de vapeur correspondante par cheval-heure indiqué . .	6	—	—

Turbo-alternateur monophasé de 300 kilowatts fourni à la Société des Tramways et Eclairage électrique de Linz-Urfahr. — Essai à pleine charge : pression à l'admission $8^k,9$. Marche à condensation ; surchauffe à 213°.

Consommation par kilowatt-heure effectif aux bornes $10^k,67$.

Essai à demi-charge : Pression à l'admission : 9 kilogrammes ; marche à condensation ; surchauffe à 189°.

Consommation par kilowatt-heure effectif aux bornes $12^k,56$.

Turbo-alternateur de 400 kilowatts fourni à la Société d'Exploitation de Lignite et d'Argile à Tschoepeln (Silésie),

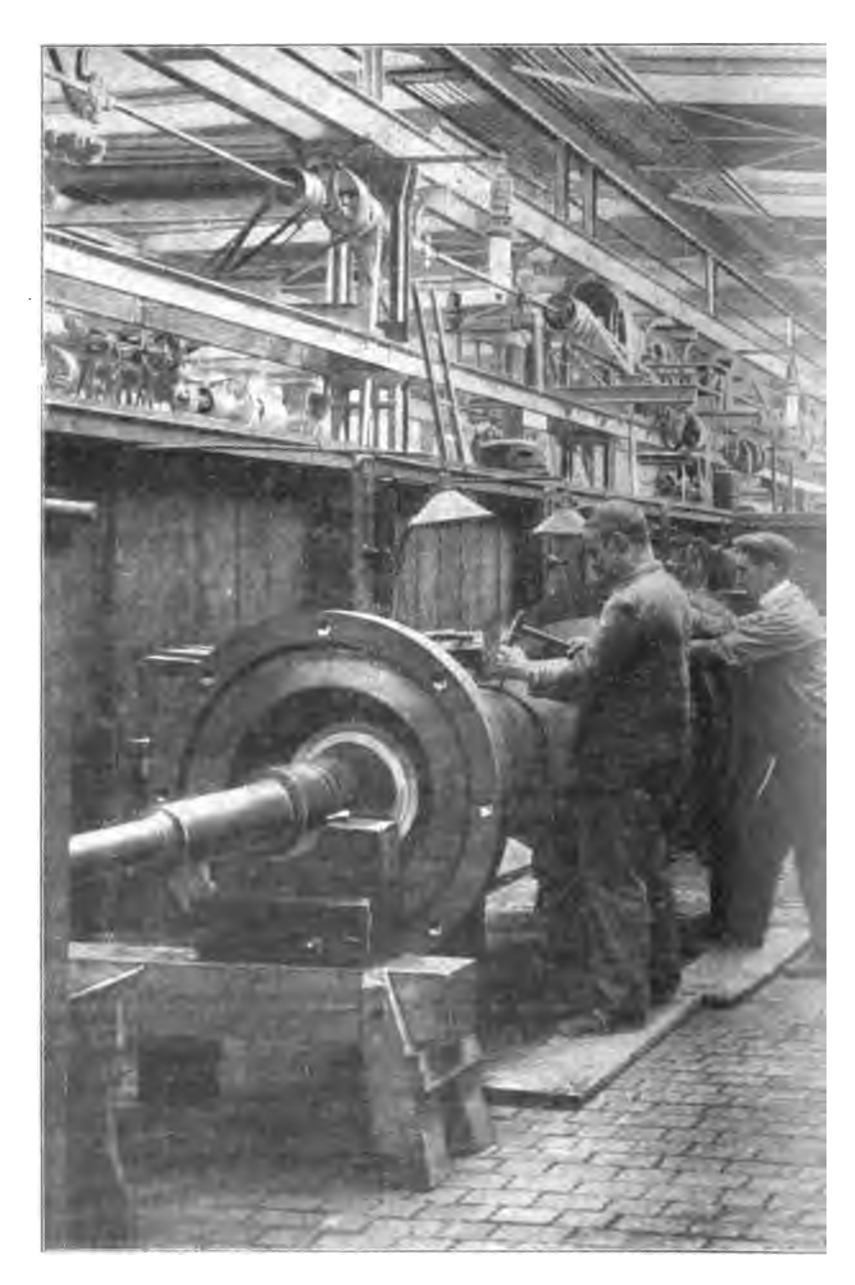
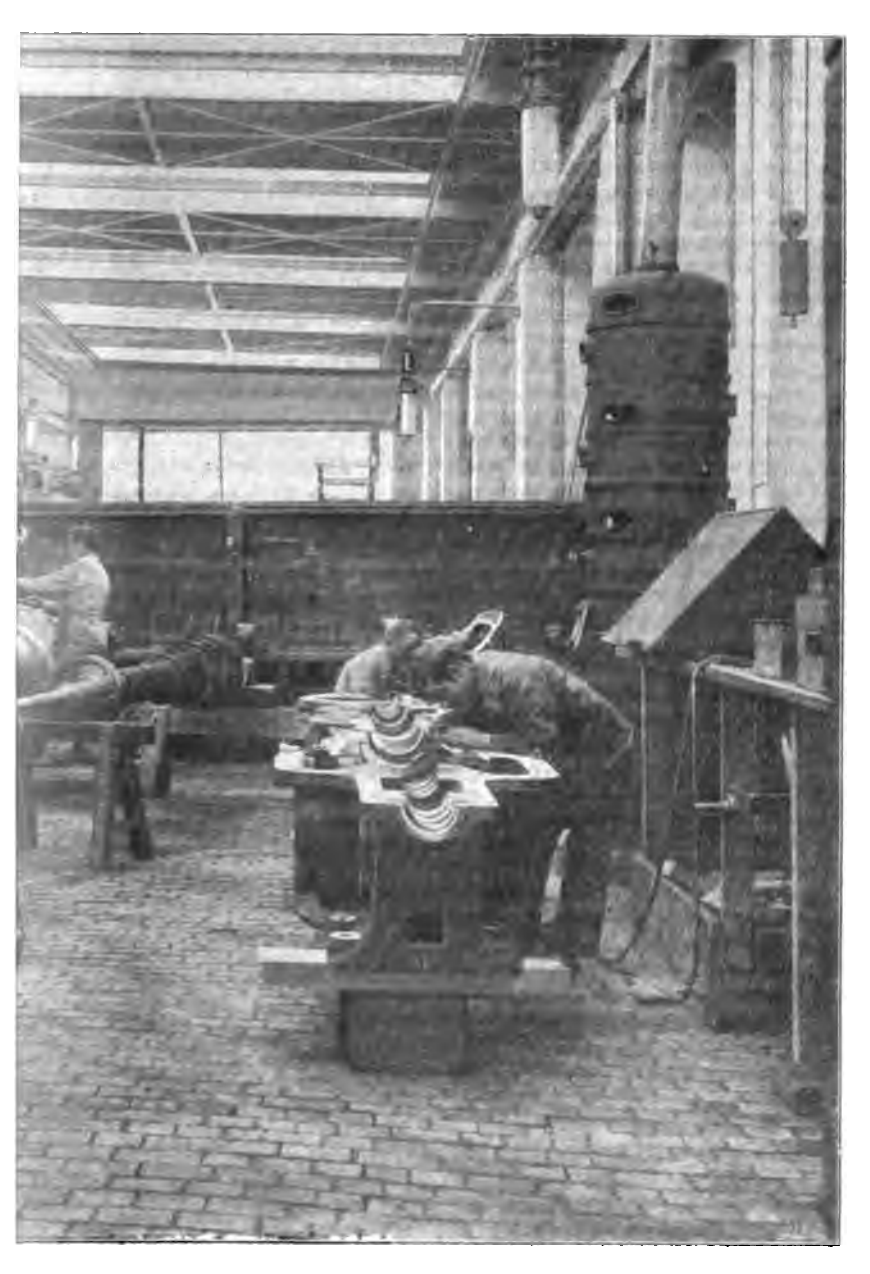


Fig. 86. — Vue de l'atelier de montage des turbi



; à vapeur Parsons (Brown-Boveri à Baden — Suisse).

Pression à l'admission : $7^k,5$; vapeur saturée et sèche ; marche à condensation.

Consommation de vapeur saturée.

Puissance	Totale par heure	Par kilowatt-heure Effective	Garantie	Différence
—	—	—	—	—
kw.	kg.	kg.	kg.	kg.
400	4.200	10,50	12,50	— 2,00
300	3.380	11,27	13,07	— 1,80
200	2.560	12,80	14,00	— 1,20
100	1.735	17,35	16,50	+ 0,85

Influence de la surchauffe. — Pour une charge de 415 kilowatts et 41°4 de surchauffe, 60 0/0 d'économie, par conséquent 1 0/0 d'économie par 6°9 de surchauffe.

Pour une charge de 212 kilowatts et 41°6 de surchauffe, 7,1 0/0 d'économie, soit 1 0/0 d'économie de vapeur par 5°,8 de surchauffe.

Installées d'abord pour servir de réserve ou de secours aux moteurs à vapeur à pistons, il fut bientôt reconnu qu'il était préférable de faire travailler constamment les turbines, en raison de leur meilleur rendement. C'est ainsi qu'à Francfort et à Milan les turbo-moteurs suffisent seuls au service de jour alors que les machines à pistons ne sont plus là que comme réserve. Et ces seules turbines alimentent des services qui, autrement, à cause de la grande différence qu'ils présentent entre eux, auraient dû être alimentés par des services séparés.

A côté de l'éclairage des villes, l'industrie textile, pour laquelle la régularité de fonctionnement des moteurs est de première importance, est celle qui a fait le plus grand cas de ce nouveau système. La métallurgie s'en est également emparé et la turbine Parsons s'est acclimatée en Silésie et aux établissements de Thionville. Quand, à la suite des rigueurs excessives de l'exploitation toutes les autres machines (moteurs alimentés de gaz de hauts fourneaux) furent mises hors de service, la turbine à vapeur continua de travailler pendant des mois entiers, jour et nuit, dimanches et fêtes, sans interruption. Une seule minute d'arrêt dans un tel service aurait causé un préjudice considérable. Ce seul fait donne une preuve plus convaincante que tout ce que nous pourrions ajouter, de la valeur de la machine.

Ateliers de construction de turbines Parsons à Baden (Suisse). — Les nouveaux ateliers consacrés à la construction et au montage des turbo-moteurs comprennent trois halls de 60 mètres de longueur ; le plus grand, d'une largeur de 12 mètres possède un pont roulant mû par l'électricité et d'une force portante de 20 tonnes. C'est là que les grosses pièces sont travaillées. Les deux autres halls, de 9 mètres de large contiennent les tours et autres machines-outils. Adossée à la paroi du grand hall, se trouve la chaudronnerie qui fabrique les serpentins en cuivre pour les réservoirs à huile, les tuyauteries, etc. L'autre côté du hall est occupé par les bureaux des chefs d'atelier et d'outillage ; enfin, à l'extrémité nord se trouvent les générateurs pouvant développer la quantité de vapeur nécessaire à environ 2000 chevaux pour les essais. Cette dernière installation est complétée par les condenseurs, comportant un tour de refroidissement de 20 mètres de hauteur.

Parmi les machines-outils du grand hall, il faut particulièrement mentionner un grand tour d'une portée de 7 mètres entre pointes, pour le tournage de la partie mobile des grosses unités, et une machine à aléser les grands cylindres fixes, pouvant aléser des cylindres mesurant jusqu'à 6^{m},50 de longueur. On y remarque également un marbre d'atelier de dimensions très respectables, employé pour le traçage des cylindres et pour l'équilibrage de la partie mobile, des inducteurs, etc.

L'un des petits halls est divisé en deux parties inégales dont la plus grande, fermée par une autre cloison, constitue l'atelier où la partie mobile de la turbine et le cylindre qui l'entoure, sont munis de leurs aubages, c'est-à-dire garnis d'innombrables ateliers, montés suivant un tour de main spécial, ailettes dont la forme et l'arrangement seuls donnent à la turbine Parsons son caractère personnel.

Le quart de la partie occupée par les nouveaux ateliers est réservé au local d'essais de machines, car une grande importance est attribuée à cette partie du travail. Dans ce local se ramifie tout une combinaison de tuyauteries pour la vapeur vive, l'eau de condensation, l'échappement, etc. A côté des différentes soupapes by-pass, on a prévu des embouchures dirigées de bas en haut, de façon à permettre l'essai simultané de six turbo-moteurs. Les installations de ce local d'essais sont si simples et en même temps

si complètes, que chacun, même les personnes ne possédant pas de connaissances techniques étendues, peut se rendre compte des propriétés du moteur. Dans ce but, on a établi à l'extérieur une résistance liquide qui permet de charger à volonté les turbines par l'intermédiaire des machines électriques qui leur sont accouplées directement.

Des instruments de mesure appropriés indiquent d'une façon précise le degré de charge. La vapeur employée pour chaque régime de charge dans le turbo-générateur est aspirée hors de la turbine par une machine nommée condenseur à surface.

En sortant de la turbine, la vapeur s'écoule dans une chaudière allongée, intérieurement traversée par un grand nombre de tubes placés parallèlement et dans lesquels circule de l'eau froide. Cette eau circule par l'effet d'une pompe centrifuge commandée par un électromoteur ; la vapeur arrivant de la turbine circule le long des tubes remplis d'eau froide et se condense à leur contact. Le mélange de vapeur d'air et d'eau est évacué également au moyen d'une pompe à air actionnée par un électromoteur. L'eau provenant de la condensation est conduite pour être mesurée dans deux grands récipients gradués et reliés entre eux par un dispositif tel que, quand l'un d'eux est rempli, la mesure peut être continuée sans interruption avec l'autre, et pendant qu'on effectue la vidange du premier. On voit donc qu'il est possible, en définitive, de mesurer directement, par une simple lecture faite sur l'échelle des récipients, la quantité de vapeur transformée en eau qui a traversé la turbine, pour une puissance et un temps déterminés. En comparant les chiffres obtenus pour la quantité d'eau de condensation, aux indications des appareils de mesures électriques, on évalue directement et sans chances d'erreurs le rendement du groupe.

CHAPITRE X

Le Turbo-moteur Parsons dans la Marine

Il est un emploi de la turbine à vapeur, et particulièrement de celle due à M. Parsons, que nous ne devons pas manquer de signaler ici avec quelques détails car il a permis des applications qui semblent devoir amener une véritable révolution en matière de navigation. Ici la turbine vient faire tourner les hélices par action directe de la vapeur sur leur arbre ou du moins sur le prolongement de leur arbre. Il va de soi que le faible espace que réclame un turbo-moteur est fort à considérer à bord d'un navire, où la place est toujours comptée, et où tout emplacement économisé sur l'installation motrice trouvera à s'utiliser fructueusement pour le logement et le transport des voyageurs et des marchandises ; de plus, on sait la complexité des machines marines à mouvements alternatifs et la surveillance minutieuse qu'elles exigent. En outre, l'essence même de leur mécanisme engendre ces vibrations et ces secousses qui sont si fatigantes pour les passagers, et qui même ne sont pas sans présenter des inconvénients pour la coque du navire. Enfin il était vraisemblable de prévoir que la grande rapidité de rotation d'une hélice commandée par une turbine permettrait de réaliser des vitesses inconnues jusqu'ici, même avec les meilleures machines marines classiques.

Cette introduction des turbines à vapeur dans la marine a donné en résumé d'assez bons résultats dès le début ; pourtant quelques critiques ont été faites, notamment au sujet de la mauvaise utilisation de la vapeur du moteur. En effet, la pression décroissant depuis le centre où se trouve l'arrivée de vapeur, jusqu'aux extrémités où est l'évacuation, il eût paru rationnel de modifier les sections de passage offertes à la vapeur en raison de

la pression qu'elle possède en chaque point. Mais cette disposition n'existait pas dans ce premier appareil ; il est juste de dire que l'on y a remédié depuis, et que l'on construit actuellement des moteurs à deux ou trois expansions avec turbines à débit croissant.

En outre, le moteur à turbines expérimenté consommait beaucoup de vapeur ; on a même trouvé que la consommation était supérieure à celle des moteurs à pilon rendant les mêmes services. Mais à côté de ces inconvénients, il apparaissait clairement que la légèreté de l'appareil, son faible encombrement, et sa grande facilité de conduite, constituaient, malgré tout, de précieux avantages en sa faveur.

Des perfectionnements successifs ont été réalisés, mais jusqu'en 1892, la consommation de vapeur n'était pas de nature à justifier l'emploi de cette classe de machines à la propulsion des navires, quoique, en raison de leur légèreté et de leurs faibles dimensions, elles semblassent présenter de grands avantages sur les machines ordinaires, du moins pour certains cas. Mais il était à craindre aussi que la consommation excessive des appareils, au moins dans les petites dimensions, ne fût un obstacle à leur utilisation dans la marine, ou ne limitât leur emploi qu'à des cas particuliers.

En outre, de sérieuses difficultés d'ordre purement mécanique étaient à surmonter pour pouvoir appliquer avec succès ce système à la propulsion. Il ne fallait guère songer, par suite de la valeur importante de la puissance nécessaire pour la marche, à faire usage d'engrenages pour transmettre le mouvement de rotation de la turbine à l'arbre d'hélice, afin de réduire la vitesse de rotation considérable de celle-ci. En effet, cette énorme vitesse ne paraissait pas convenir à une bonne utilisation de l'hélice, et même en employant une turbine de grand diamètre afin de réduire la vitesse angulaire, et en se servant de la vapeur à une pression relativement basse, dans le but de diminuer la vitesse angulaire et la vitesse circonférentielle, le nombre de tours par minute semblait encore trop élevé. De plus, il fallait prévoir la nécessité de renverser la marche à un moment donné, ce qui ne paraissait pas chose facile à résoudre à première vue.

Quoi qu'il en soit, en 1894 un syndicat fut formé en Angleterre pour faire un essai complet de l'application de la turbine à vapeur

du système Parsons à la propulsion des navires, et l'on établit dans ce but les plans d'un bâtiment. En prévision des nombreux changements qu'il y aurait probablement lieu de faire avant qu'on pût obtenir un résultat satisfaisant, et aussi voulant restreindre autant que possible la dépense que les essais devaient entraîner, on décida d'adopter des dimensions aussi faibles que possible, mais suffisantes toutefois pour avoir la possibilité d'atteindre une vitesse qui, dans les prévisions des constructeurs, devait être sans précédents, si le fonctionnement de toutes les parties de l'appareil était aussi bon qu'on l'espérait.

Le torpilleur construit d'après les plans élaborés dans cet esprit a reçu le nom de *Turbinia*. Nous résumons en quelques lignes les principales caractéristiques de ce bâtiment.

Les dimensions de la *Turbinia* étaient 30^m,50 de longueur, 2^m,74 de largeur, avec un déplacement de 44 tonneaux et demi et un tirant d'eau de 0^m,915.

La première machine à turbine placée à bord devait développer une puissance réelle de plus de 1.500 chevaux à la vitesse de 2.400 à 2.500 tours par minute. La chaudière est à tubes d'eau, et sa pression de régime est de 15^k,8; elle a un volume de vapeur et des tubes de retour très grands ; sa surface de chauffe totale est de 130 mètres carrés, et sa surface de grille de 3^{m2},90. Les chambres de chauffe sont closes et le tirage est activé par un ventilateur conduit directement par l'arbre de la machine.

Les poids approximatifs sont :

Machines principales 3.708 kg.	
Poids total des machines principales et auxiliaires, avec la chaudière, les hélices et leurs arbres, les réservoirs, etc. . .	22 t.
Poids de la coque complète	15 t.
Charbon et eau	7 t. 5
Soit un déplacement total de	44 t. 5

Quant à la machine, elle consiste, avons-nous dit, en une turbine système Parsons, ayant beaucoup d'analogie avec le moteur actionnant une dynamo dont nous avons parlé plus haut.

Le moteur à turbine consiste en une série de roues fixées parallèlement les unes à côté des autres et formant en quelque sorte

autant de turbines élémentaires multipliant un grand nombre de fois la force d'une seule roue. Elle comporte deux parties essentielles : la première est une enveloppe cylindrique fixe portant des anneaux constitués par des ailes en saillie intérieurement, et formant des cloisons guides ou aubes de direction ; la seconde partie, formant la turbine proprement dite, est constituée par l'arbre mobile qui passe aux travers des anneaux fixes et tourne concentriquement à ceux-ci. Cet arbre porte également une série d'anneaux constitués par des ailes formant une saillie extérieure, et tournant naturellement avec lui sur des paliers.

Les anneaux guides fixés sur l'enveloppe touchent presque l'arbre, tandis que les anneaux fixés sur l'arbre sont situés dans l'intervalle de ceux de l'enveloppe, et touchent presque celle-ci.

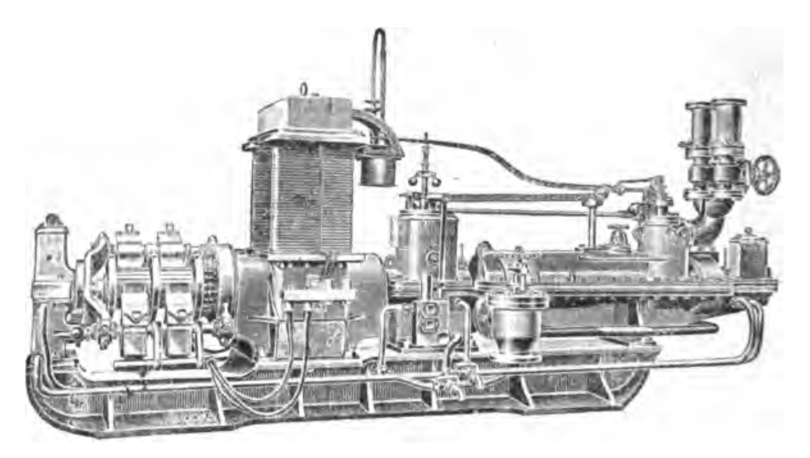


Fig. 87. — Turbine Parsons et alternateur, premier modèle.

Les cloisons guides sont taillées sur la périphérie interne des anneaux en bronze qui sont ensuite recoupés par moitié, et fixés dans la partie cylindrique par des tenons ; les aubes mobiles sont taillées dans la périphérie des anneaux en bronze qui sont ensuite filetés et tenus sur l'arbre, où ils sont calés par le serrage des anneaux extrêmes qui sont vissés sur lui. Pour éviter les chocs dans le passage des aubes fixes aux aubes mobiles, et diminuer la vitesse restante de la vapeur à la fin de son action, on a adopté dans la turbine à vapeur compound le système dit à *flux parallèle*, parce que la vapeur parcourt la série de turbines élémentaires en

suivant une direction parallèle à l'axe, de préférence aux systèmes dits à *flux intérieur* ou *extérieur*, dans lesquels la vapeur arrive dans chaque turbine et s'en échappe soit intérieurement soit extérieurement. La vapeur, à son entrée dans la turbine, passe d'abord à travers une cloison-guide et est projetée avec un mouvement de rotation sur l'anneau suivant mobile, en communiquant aux aubes une force rotative ; la vapeur, est alors rejetée sur l'anneau suivant des cloisons-guides, et ainsi de suite jusqu'au dernier anneau, les réactions successives augmentant la force de rotation. Après avoir agi ainsi dans la turbine, la vapeur est évacuée à l'air libre ou au condenseur. Le volume occupé successivement par la vapeur sur les turbines élémentaires est calculé de façon à correspondre à l'augmentation du volume dû à la perte de pression dans chaque turbine ; la vapeur se détend graduellement par de petits accroisements successifs.

La machine se met immédiatement en marche à l'arrivée de la vapeur, qui est admise dans la turbine en quelque sorte par une série de bouffées, par l'ouverture et la fermeture périodique dues à la double oscillation d'une soupape qui agit par l'intermédiaire d'un mécanisme relié mécaniquement avec l'arbre de la turbine. Chaque turbine évacuant sans arrêt dans la suivante la force vive restant à la vapeur, après qu'elle a quitté les aubes mobiles, n'est pas perdue comme dans la turbine à eau, mais continue à entretenir le mouvement de la machine.

La vapeur est admise à la pression de 30^{k},5 ; elle s'échappe dans un condenseur par sillage de grandes dimensions ; sa surface refroidissante est de 390 mètres carrés. Les machines auxiliaires comprennent une pompe à air, une pompe de circulation, des pompes alimentaires, des pompes à huile et aussi des éjecteurs à cale ordinaires. Malgré ce supplément d'appareils auxiliaires, la machinerie de la *Turbinia* ne pèse que 4.572 kilogrammes, soit un peu plus de la moitié du poids d'une machine ordinaire de même puissance.

Les installations de la *Turbinia* sont relativement confortables pour un bâtiment ayant des dimensions aussi exiguës, et malgré la finesse de ses lignes, en vue d'une grande vitesse. Elle est partagée en cinq compartiments étanches et les principaux compartiments sont pourvus d'éjecteurs : la construction est aussi légère que possible. Les machines sont tout à fait au fond du bâtiment,

ce qui est un avantage sur un bâtiment de guerre ; on obtient ainsi une grande stabilité et une meilleure protection.

La puissance assez considérable qui est nécessaire pour faire mouvoir le bâtiment à la vitesse de 30 nœuds est obtenue au moyen d'une seule chaudière à tubes d'eau. Les foyers sont aux extrémités avant et arrière de la chaudière, et sont placés dans deux chambres de chauffe fermées, situées dans le plan longitudinal.

Dans le projet primitif de la *Turbinia*, il devait y avoir une turbine unique à flux parallèle actionnant l'arbre. L'hélice était portée par cet arbre dans le prolongement de celui de la turbine et tournant ainsi à la même allure de 2.400 tours environ par minute ; à cause de cette énorme vitesse, les échantillons de l'hélice et de la ligne d'arbre avaient été beaucoup réduits. Le palier de butée est supprimé, la poussée de l'hélice est simplement contre-balancée par la pression de la vapeur s'exerçant sur une des extrémités de la partie mobile de la turbine; il résultait de cette suppression une diminution dans les frottements et les poids.

Des essais ont été faits au début avec des hélices de modèles divers, mais les résultats n'ont pas été satisfaisants, et ils ont démontré qu'une grande partie de la puissance se perdait dans l'hélice. Cela tenait en partie au phénomène que M. R. E. Froude a désigné sous le nom de *cavitation*, qui consiste en la formation de cavités ou d'espaces vides dans l'eau remuée par les ailes de l'hélice ; cet inconvénient est d'autant plus sensible que la vitesse de l'hélice est grande. On a fait alors une série d'essais avec des modèles d'hélices à deux ailes de $50^{mm},8$ de diamètre tournant dans un bain d'eau chaude, élevée à une température approchant de quelques degrés seulement du point d'ébullition, et on se plaça dans des conditions d'immersion du propulseur et de la vitesse de rotation se rapprochant, autant que possible, des conditions et des forces qui devaient agir réellement sur l'hélice. On put observer qu'une cavité se formait d'abord un peu sur l'arrière de l'arête d'entrée et près de l'extrémité de l'aile, et cette cavité augmentait avec la vitesse dans de telles proportions que lorsqu'on fut arrivé à une vitesse correspondant à celle que devait avoir le propulseur de la *Turbinia*, la cavité s'était accrue au point de découvrir un secteur de 90^0 sur le disque formé par l'hélice. Dans ces conditions, toute l'énergie de l'hélice se dépensait à maintenir

cet espace vide. On vit aussi que quand la cavité avait grandi, jusqu'à être un peu plus grande que la largeur de l'aile, l'arête

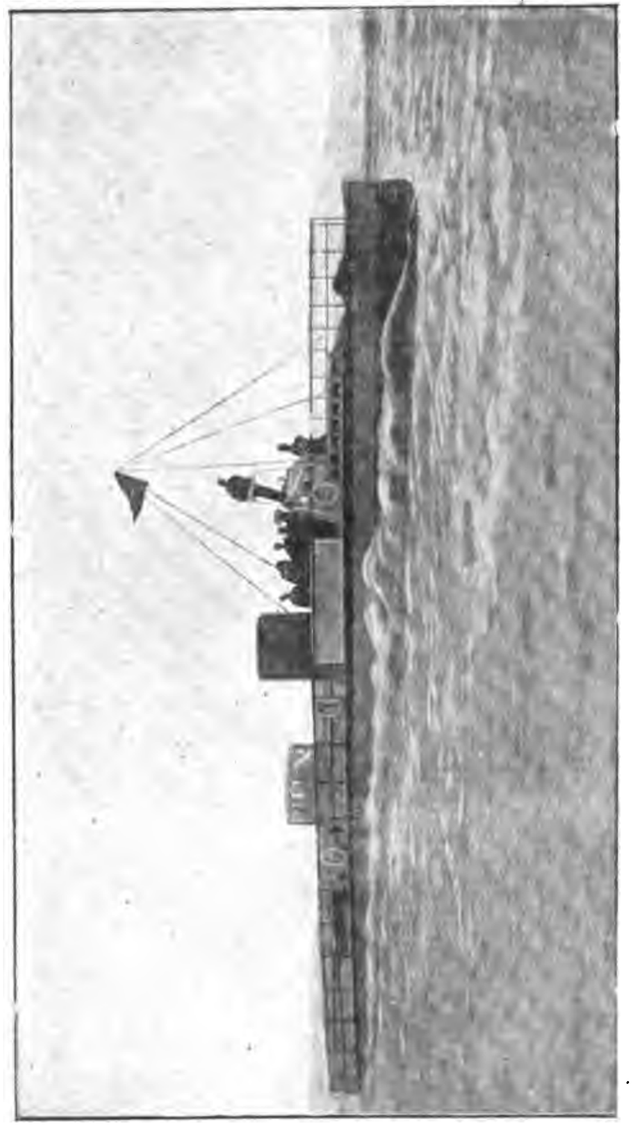


Fig. 88. — Le bateau à turbo-moteur Parsons la *Turbinia*.

d'entrée agissait comme un coin, et par son côté avant, produisait une poussée négative.

Ces essais semblent montrer que pour toutes les hélices, il

existe une poussée limite dépendant du recul et de l'épaisseur de l'aile ; au delà de cette vitesse, il se produira une grande perte de force. On a pu conclure aussi de ces essais que si l'on veut augmenter encore la vitesse des bâtiments, on sera conduit à adopter des pas un peu plus grands que ceux employés actuellement.

La turbine simple fut alors débarquée du bâtiment et fut remplacée par trois turbines compound séparées, directement accouplées à trois arbres d'hélices et travaillant en série comme turbines à haute, moyenne et basse pression. Les trois nouveaux arbres d'hélices étaient d'échantillon réduit. Par ce changement, la puissance transmise à chaque arbre était réduite à un tiers, et en même temps la division de la machine en trois parties permettait d'obtenir un appareil moteur plus compact et une meilleure utilisation. Le poids total des machines et la vitesse de rotation étaient restés les mêmes.

En décembre 1896, on fit plusieurs parcours sur le mille mesuré, et la vitesse moyenne maximum fut de 29 n., 6, le nombre moyen de tours des machines étant de 2.550 par minute. On pouvait prévoir à la suite de ces essais qu'avec quelques changements, on pourrait obtenir des vitesses beaucoup plus grandes, car on avait remarqué que toute la puissance de la machine n'était pas complètement utilisée. En effet, de nouveaux essais ont été faits le 1er avril 1897, avec de nouveaux propulseurs d'un pas plus grand. La moyenne des deux parcours consécutifs a donné une vitesse de 31 n., 01, le nombre de tours des machines étant de 2.100 par minute. La puissance maximum indiquée pour obtenir cette vitesse a été calculée à 946 chevaux, d'après les essais qui ont été faits sur le modèle construit d'après la méthode de M. William Froude. Or si l'on admet que la puissance de la propulsion est les 0,60 de la puissance indiquée (ce qui paraît être le rapport constaté pour les torpilleurs et les bâtiments qui ont des lignes d'eau très fines), la puissance indiquée correspondant à la vitesse de 31 n., 01 est de

$$946 \times \frac{100}{60} = 1.576 \text{ chevaux.}$$

La consommation de vapeur a été relevée pendant la marche à 28 nœuds, et d'après elle, on a calculé la consommation à

31 n., 01, conformément à la loi qui relie la pression à la consommation d'eau d'alimentation, et d'après les pressions observées aux machines pour les vitesses respectives. Cette consommation a été trouvée de 11.340 kilogrammes par heure ou 7^{kg},194 par cheval indiqué. La consommation de vapeur à 11 n., 4 a été mesurée au compteur, et on a constaté qu'elle était de 1.224^{kg},7 par heure, ou équivalente à une consommation de charbon d'environ 11^{kg},16 par mille parcouru.

Nous donnons ci-après les conditions et les résultats des essais de la *Turbinia* à la vitesse de 31 n., 01.

Nombre de tours moyen des machines : 2.100.

Pression de la vapeur à la chaudière : 14^{kg},6.

Pression de la vapeur aux machines : 9^{kg},4.

Puissance de poussée (calculée) : 946 chevaux.

Puissance de propulsion indiquée (calculée) : 1.576 chevaux.

Consommation de vapeur calculée pour la vitesse de 31 n., 01 : 11.340 kilogrammes.

Consommation de vapeur par cheval indiqué et par heure : 7^{kg},194.

Poids total de la machinerie comprenant : chaudières, condenseur, machines principales, machines auxiliaires, lignes d'arbres, propulseurs : 22.353 kilogrammes.

Puissance indiquée par tonne de la machine totale : 72^{ch},1,

Avant d'en terminer avec la *Turbinia*, il nous paraît intéressant d'ajouter à ces notes quelques extraits d'une conférence faite par M. Bertin à une séance de l'Association technique maritime, et établissant une comparaison, au point de vue des formes de la carène entre la *Turbinia* et le *Forban*, le remarquable torpilleur de M. Normand. Le *Forban* est choisi ici comme le plus parfait des navires expérimentés.

Les résultats obtenus sur la *Turbinia* sont très étonnants, dit-il, bien qu'ils ne doivent rien présenter de paradoxal aux yeux de M. Normand, qui connaît, pour l'avoir énoncé le premier, la loi des variations du coefficient d'utilisation applicable aux petits navires et aux très grandes vitesses.

Le public n'a vu dans la vitesse de la *Turbinia* que le succès d'un moteur nouveau, qui a sans doute de l'avenir, mais qui ne remplacera pas demain la vieille machine à mouvement alternatif.

Le petit navire de M. Parsons n'est cependant pas moins intéressant à un autre point de vue : celui des proportions et des formes de la carène ; car, ainsi que l'a très bien mis en lumière M. Minet, ingénieur des constructions navales, ce n'est pas principalement à la légèreté de son moteur que la *Turbinia* doit d'avoir réalisé, avec 45 tonneaux de déplacement une vitesse analogue à celle du *Forban* de 145 tonneaux.

Le moteur de la *Turbinia* pèse 14 kilogrammes par cheval, tandis qu'au même degré d'approximation, celui du *Forban* pèse 17 kilogrammes ; le rapport est de 1,21. Avec cette différence modérée du cinquième dans le poids, s'en ajoute une de plus du tiers, dans le cube du coefficient d'utilisation, qui a la même influence que le poids sur la vitesse.

On trouve en effet, d'après les résultats publiés pour les deux bâtiments :

	M	M^3	M_1	M^3_1
Turbinia . . .	3, 4	39, 3	6, 2	238
Forban . . .	3, 1	29, 8	5, 6	176

ce qui donne bien $\frac{238}{176} = 1,35$.

L'avantage de la *Turbinia* porte donc surtout sur l'utilisation de la carène. En raison même de la manière dont le travail a été évalué pour la *Turbinia*, le rendement des propulseurs n'est pas en cause.

Sans doute, conclut M. Bertin, la *Turbinia* n'est pas un navire dans le sens propre du mot, mais plutôt un grand modèle très intéressant. Pour l'application exacte de ses coefficients et de ses utilisations à un croiseur, il faudrait considérer, non plus les grandes vitesses, mais des vitesses énormes. Quoi qu'il en soit les valeurs inattendues et sans précédents de ses coefficients, les valeurs intéressantes de ses utilisations, qui seraient plus intéressantes encore, si l'on en possédait les courbes complètes déduites d'essais progressifs, montrent comment les relations entre les coefficients de la carène et l'utilisation peuvent et doivent varier profondément avec la vitesse et les dimensions absolues des carènes.

A la suite des séries d'essais effectués avec plein succès sur la *Turbinia*, et devant les résultats vraiment remarquables comme vi-

tesse et comme légèreté de machine obtenus par ce petit bâtiment de 45 tonneaux l'attention du monde maritime tout entier a été attirée avec juste raison sur la question de la propulsion des navires par les turbines à vapeur. En Angleterre, la Compagnie formée sous la direction de M. Parsons reçut de l'amirauté la commande d'un contre-torpilleur établi sur le même principe que la *Turbinia*, c'est-à-dire avec installation de turbines motrices à vapeur. On n'exigeait pas de la part des constructeurs une vitesse déterminée, comme dans le cas des destroyers ordinaires, mais ils devaient essayer d'atteindre la vitesse de 35 nœuds. M. Parsons n'avait d'ailleurs aucun doute sur la possibilité d'arriver facilement à la réalisation de cette vitesse prévue.

Ce torpilleur du type destroyer a reçu le nom de *Viper*.

Sa disposition générale des moteurs, lignes d'arbres et propulseurs de la *Viper* était un peu différente de celle qui a été adoptée sur la *Turbinia*. Sur ce dernier, il y avait, comme nous l'avons vu, trois arbres moteurs actionnant chacun trois hélices, tandis que sur la *Viper*, il y a quatre arbres moteurs actionnant chacun deux hélices, soit huit hélices, au lieu de neuf, mais les huit propulseurs de la *Viper* devaient lui imprimer une vitesse supérieure à celle obtenue par les neuf hélices de la *Turbinia*, bâtiment de tonnage environ huit fois moins grand, et par suite de maître couple et de surface de frottement environ quatre fois plus faible. On était donc conduit à supposer que pour avoir une résistance relative satisfaisante au point de vue de leur rendement, les hélices de la *Viper* devaient avoir un diamètre plus grand et un pas également plus grand que celles de la *Turbinia*. Le diamètre ayant été effectivement doublé, le nombre de tours a été réduit de moitié, afin de se maintenir dans les limites convenables de vitesse circonférentielle des extrémités d'ailes des hélices. Il en est résulté, pour réaliser cette condition, une disposition différente des turbines elles-mêmes.

Quoi qu'il en soit, les essais ont prouvé que le fonctionnement économique des machines était supérieur à celui de la *Turbinia* ce qui n'a d'ailleurs rien d'anormal car l'augmentation de puissance et de dimensions des turbines ne pouvait être que favorable à leur rendement.

L'essai officiel de la *Viper* eut lieu le 4 mai 1900, au large de l'embouchure de la Tyne, dans la mer du Nord.

Les constructeurs furent peu favorisés pour les essais de ce bateau qui durent être retardés longtemps à cause du mauvais temps. A plusieurs reprises la date fut arrêtée, mais le jour arrivé on était obligé de remettre les essais à une date ultérieure. Enfin dans la matinée du 4 mai, la brise, quoique très forte, accompagnée de grains pluvieux, tourna S.-S.-O. et bien que la mer fût beaucoup plus grosse qu'on ne l'eût désiré, en raison de la vitesse à obtenir et du bien-être des personnes devant rester sur le pont, on décida de procéder aux essais.

La *Viper* tourna au nord aussitôt qu'elle eut dépassé le môle de Tynemouth, et marcha jusqu'au mille mesuré avec le vent et la mer de la hanche. Quand elle eut parcouru le mille, la pression n'était pas encore atteinte, et même au second parcours, la vitesse n'atteignit pas tout à fait 30 nœuds. On fit dix parcours en tout, en prenant les six meilleurs parcours consécutifs, avec le courant et contre le courant, et on obtient la vitesse de $34^{n},28$. Les deux meilleurs parcours donnèrent une vitesse moyenne de $34^{n},8$ tandis que la vitesse moyenne des trois heures fut de $33^{n},96$.

Le nombre de tours moyen fut de 1050 par minute et la pression moyenne de la vapeur de $11^{kg},60$ par centimètre carré, la pression maximum étant de $12^{kg},3$. Il y a lieu de considérer qu'une grande partie de la vapeur fut perdue par les soupapes de sûreté, qui n'avaient pas été assez serrées avant le départ, et qui commencèrent à fuir aussitôt après qu'on fut allé sur le mille.

La surface de chauffe totale des quatre chaudières Yarrow était de $1.393^{m^2},5$, et la surface de grille de $25^{m^2},62$. La pression d'air donna le chiffre moyen de $76^{mm},2$ à l'indicateur.

La puissance indiquée en chevaux et estimée en raison de la pression de la vapeur et du nombre de tours fut de 11.000 chevaux ce qui constitue un excellent résultat, même en ayant égard au rendement de la machine. Le bâtiment était à l'eau déjà depuis quelque temps, et l'on a dit que sa carène n'était nullement propre. Les ingénieurs de la Compagnie Parsons ont affirmé eux-mêmes qu'ils étaient certains de pouvoir obtenir 36 nœuds avec une carène propre et par un beau temps, mais en prenant les précautions nécessaires pour employer toute la vapeur et n'en pas laisser perdre par les soupapes de sûreté.

Le rapport du poids de la turbine à vapeur au poids des machines ordinaires est comme 35 à 53. Quant à la chambre des machines,

on peut dire que celle de la *Viper* était de la même grandeur que celles des autres bâtiments de sa classe, mais il faut tenir compte naturellement de la puissance supplémentaire développée par sa machine. Les dimensions de la chambre des machines offrent d'ailleurs une juste base de comparaison, car l'espace occupé par la turbine est moindre que dans les machines ordinaires, et elle se prête particulièrement bien à un arrimage convenable.

Notons aussi que la *Viper* possédait deux grands condenseurs cylindriques qui, avec le tuyautage et leurs accessoires occupaient la plus grande partie de la chambre des machines, et on peut ainsi se faire une idée de l'économie d'espace obtenue par l'emploi des turbines à vapeur. La surface refroidissante de ces condenseurs est de $743^{m^2},2$.

Voici quelques chiffres concernant les poids :

Poids des chaudières complètes, compris l'eau	102.366 kg.
Poids des machines complètes avec les appareils auxiliaires, compris l'eau des condenseurs.	53.153
Poids des hélices et lignes d'arbres . .	7.849
Soit un total de	163.368 kg.

pour l'appareil moteur et évaporatoire complet, ce qui fait environ 15 kilogrammes par cheval.

Les hélices mesuraient un diamètre extérieur de 1 mètre environ, avec un pas moyen de $1^m,37$. Les arbres tournaient avec une vitesse angulaire de 1.050 tours environ (en chiffres ronds), ce qui est à peu près la moitié de la vitesse des arbres de la *Turbinia*, mais comme le diamètre, des hélices de ce dernier bâtiment était de $0^m,50$, il s'ensuit que la vitesse circonférentielle à l'extrémité des ailes est sensiblement la même dans les deux cas, c'est-à-dire 80 mètres par seconde.

La vitesse angulaire des turbines étant réduite, le constructeur a donc pu augmenter beaucoup leur diamètre et par suite la vitesse circonférentielle des aubages, tout en se trouvant dans les meilleures conditions au point de vue de la fatigue du métal due à la force centrifuge et au point de vue de la bonne utilisation de l'énergie emmagasinée par la vapeur. Celle-ci subit du reste une assez grande expansion puisqu'elle entre dans la turbine H P par

un orifice de $0^{m^2},0380$ et s'échappe de la turbine BP par un orifice de $0^{m^2},3716$; la détente totale serait donc de 10 environ.

Le diamètre du cylindre HP est de $0^m,899$ et celui du cylindre BP de $1^m,270$. Ils se trouvaient placés horizontalement au fond du bâtiment d'une façon très avantageuse. En fait, l'appareil à haute pression est tout entier sous le plancher de manœuvre et complètement en dehors de la vue.

Les trépidations produites par le battement des hélices sont presque entièrement absorbées par l'action de la vapeur sur les turbines ; en même temps, grâce à la grande vitesse de rotation des hélices et à l'absence de mouvement alternatif, les vibrations de la coque sont très faibles, ce qui constitue un avantage pour le tir des canons. De plus, la sécurité et le confortable résultant de l'absence presque complète de vibrations sont très grands, ce qui est surtout appréciable par le travers d'une grosse mer.

En ce qui concerne les machines principales, il n'est possible de s'apercevoir qu'elles sont en marche qu'en ayant recours aux indications de mesures stéthoscopiques fournies par un crayon placé sur l'enveloppe de la turbine. Malheureusement, les machines auxiliaires sont du type ordinaire et font le bruit habituel. Peut-être sera-t-il possible, comme cela a été proposé, de faire usage d'un système électrique pour conduire les machines auxiliaires, la dynamo dans ce cas étant mue par une turbine à vapeur, ce sera un grand progrès, même avec une transmission de mouvement utilisée pour les pompes. Un autre avantage du système a pu être constaté au cours des essais par grosse mer, c'est que le petit diamètre des propulseurs multiples leur permettait de rester immergés même quand le bâtiment se trouvait soumis en même temps au roulis et au tangage dans une mer venant de la hanche. Toutes les hélices étaient en dessous du bâtiment et complètement protégées par la coque.

Essai de consommation de la « Viper ». — Le rendement du moteur à vapeur à turbines employé à la propulsion de certains bâtiments, tels que les contre-torpilleurs, a été amplement mis en évidence, d'abord avec la *Turbinia*, et plus particulièrement par la *Viper*, qui dans essai de Portsmouth, que nous venons de décrire a atteint la vitesse satisfaisante de $33^n,838$. Il est probable qu'on aurait pu ainsi qu'on l'a vu, obtenir davantage, mais ce résultat était plus que suffisant d'après les conditions du

contrat. Le seul point qui restait à déterminer a rapport à l'économie de la turbine à vapeur comparée à celle de la machine à mouvement alternatif, et les résultats sont connus maintenant. Comme la puissance ne peut être déterminée exactement, la seule mesure de comparaison exacte est la consommation par heure pour une vitesse donnée. Dans un essai de trois heures à $31^n,118$ la *Viper* a brûlé 9.002 kilogrammes par heure et dans un autre essai de trois heures à $33^n,838$ la consommation a été de 11.650 kilogrammes par heure.

L'*Albatross*, construit par MM. Thornycroft, est le seul contre-torpilleur ayant des machines à mouvement alternatif qui, dans un essai officiel, ait obtenu une vitesse approchant de celle de la *Viper*, elle a été de $31^n,552$ pour une puissance des machines de 7.732 chevaux indiqués, le déplacement de l'*Albatross* est de $384^t,5$ et celui de la *Viper*, 385 tonneaux. Pour le premier, le charbon brûlé par heure a été de 7.926 kilogrammes à $31^n,552$ et pour le second 9.002 kilogrammes à $31^n,118$. Il y a donc une sérieuse base de comparaison qui dispense de tout commentaire.

Le destroyer de 30 nœuds ayant des machines à mouvement alternatif consomme 6.872 kilogrammes par heure; ce résultat étant la moyenne de 45 bâtiments.

Dans un essai de consommation de 12 heures à 16 nœuds, la dépense de charbon, pour la *Viper*, a été de $16^t,5$ soit une moyenne de 1.375 kilogrammes par heure, alors que la moyenne des contre-torpilleurs ordinaires n'est que de 800 kilogrammes environ à cette même vitesse.

Dans un autre essai de consommation de trois heures, exécuté le 31 août, aux 3/4 de la puissance maximum, à la vitesse de $33^n,8$, la consommation de charbon a été de 11,634 kilogrammes par heure, la puissance développée ayant été estimée à environ 10.300 chevaux indiqués, en prenant ce chiffre pour base de calcul, on voit que la consommation a été de $1^{kg},129$ par cheval-heure. Dans l'essai à 31 neuds, la consommation a été de $1^{kg},0796$.

Dans l'essai précédent à $31^n,118$ pendant trois heures, la consommation de charbon a été inférieure à $1^{kg},134$ par cheval-heure, ce qui est le maximum exigé par les destroyers de 30 nœuds.

Si nous nous en référons aux indications données dans la brochure de M. Hart, ingénieur attaché au service maritime de la

Compagnie du Nord [1], nous voyons qu'après que la *Viper* et le *Cobra*, qui le suivit à peu d'intervalle, se furent brisés sur des roches près de Guernesey, l'Amirauté anglaise poursuivit les essais avec le *Velox*, contre-torpilleur présentant la particularité de posséder sur le prolongement avant des turbines B P deux petites machines alternatives accouplées, pouvant être débrayées pour la marche avant, et ne servant que pour cette marche seule et pour des vitesses inférieures à 15 nœuds. Actuellement, la marine anglaise a encore en construction un croiseur de 3e classe, l'*Amethyst* qui sera muni de turbines à vapeur.

Un certain nombre de paquebots et de yachts ont été également munis de turbines Parsons. Le premier en date est le *King Edward*, construit en 1901 pour une compagnie de navigation de la Clyde, présidée par le capitaine Williamson, par les ateliers Denny Bros de Dumbarton. Les dimensions de ce bâtiment sont les suivantes :

Longueur	76m,20
Largeur	9 ,75
Creux au pont principal	3 ,20
Déplacement approximatif	650 tx.

La consommation de charbon, à vitesse égale, d'un bâtiment à roues de même tonnage faisant le même trajet, la *Duchess of Hamilton* a été notablement inférieure et, à la suite de ce succès le capitaine Williamson a fait construire un second navire à turbines, plus grand que le *King Edward*, le *Queen Alexandra* et qui présente les dimensions suivantes :

Longueur entre perpendiculaires . . .	82m,35
Largeur au maître-coup'e	9 ,15
Creux au pont principal	3 ,50
Déplacement approximatif	750 tx.
Pression à la chaudière	10k,500
— à la turbine H. P.	9 ,500
— à la turbine B. P.	5 ,750
Vitesse réalisée.	21m,68
Coefficient d'utilisation M_1 (environ) . .	5 ,72
Puissance développée en chevaux indiqués (approximativement)	4.500 chx.

1. *Les Turbines à vapeur*, leur application à la propulsion des navires, 1 brochure de 68 pages. Gauthier-Villars, éditeur.

Les propulseurs ont un diamètre de $1^m,22$ pour l'hélice principale commandée par la turbine HP, et de $0^m,915$ pour les quatre hélices latérales montées deux à deux sur chacun des arbres commandés par les turbines B P. Le nombre de tours est de 700 par minute pour la grande hélice, et de 1000 pour les hélices latérales.

Les résultats mécaniques et économiques fournis par ce navire ont corroboré les espérances qu'avait fait naître le *King Edward*, et ont incité les entreprises de navigation à adopter le turbo-moteur dans leurs nouveaux paquebots. Actuellement, il y a 91.600 chevaux construits. Le service de l'Etat Ostende-Douvres les Compagnies du *London Chatham* et du *London Brighton* ont maintenant des navires mus par des turbines Parsons et qui font le service de la Manche entre Douvres et Calais et Dieppe-Newhavon et de nombreuses autres unités sont en cours de construction.

Il ressort de ce qui précède que les divers points de vue à envisager dans cette application sont :

1° La consommation de vapeur, et par suite de combustible ;

2° Les frais d'entretien et de réparations ;

3° Le poids et l'encombrement des moteurs ;

4° La forme des propulseurs et leur vitesse de rotation ;

5° La marche arrière ;

6° Les effets gyroscopiques à craindre.

Une pratique de plusieurs années a permis d'élucider successivement tous ces points et on peut affirmer que la turbine, comme moteur marin présente sur la machine alternative certains avantages.

Avantages et inconvénients probables des turbines motrices. — En matière de conclusion, résumons en quelques lignes les avantages et les inconvénients qui peuvent paraître actuellement résulter de l'emploi des turbines comme moyen de propulsion des navires.

Du côté des avantages, nous trouvons : l'accroissement dans les vitesses, la légèreté résultant d'une réduction du poids des machines, des arbres, des hélices et aussi de la coque, la réduction d'encombrement, la suppression des vibrations presque complètement, la diminution du diamètre des hélices, une plus grande simplicité dans la conduite, et une économie probable d'installa-

tion, se traduisant par une réduction de prix du bâtiment, des frais du personnel effecté à la machine et du prix d'entretien en service courant.

Au point de vue de la légèreté, qui n'est pas douteuse, elle a été poussée sur la *Turbinia* à une limite qui semble ne pouvoir être dépassée sans danger, et qu'on ne pourrait certainement pas réaliser sur de plus grands bâtiments sans subir vraisemblablement une réduction de vitesse. Ainsi les machines de la *Turbinia* ont un poids environ moitié moindre que celui des machines ordinaires qui auraient pu être installées dans des conditions analogues, et le poids total des machines en y comprenant la chaudière et les condenseurs, n'est pas de plus des deux tiers de celui d'une machine ordinaire d'égale puissance. De plus, une diminution dans les frottements et les poids est obtenue par la suppression du palier de butée et de ses supports. En outre, la vitesse énorme communiquée au propulseur permet de réduire des dimensions des arbres et des hélices.

Ainsi l'économie réelle de poids sera certainement importante et pourra être utilisée pour consacrer une fraction de déplacement à l'installation de l'artillerie, à l'augmentation des pièces de rechange, ou à l'approvisionnement du combustible procurant un grand rayon d'action. Cette économie de poids pourrait aussi servir sur les bâtiments, tels que les torpilleurs, à renforcer les dimensions des chaudières et les rendre ainsi plus puissantes et capables de donner une plus grande vitesse.

D'après les essais des turbines de M. Parsons, ce constructeur ne craint pas d'avancer qu'il estime que le poids des machines d'un transatlantique pourrait être réduit de moitié par l'adoption de ces nouveaux moteurs.

Par suite de la réduction d'encombrement, la manœuvre se trouve facilitée par un plus grand espace disponible à bord.

La diminution de vibrations, qui deviennent presque insensibles procure, en outre, du confortable à bord, une meilleure utilisation des appareils de combat, et permet de réduire les échantillons de la coque.

L'avantage de la réduction du diamètre des hélices permet un tirant d'eau réduit, et rend possible la navigation dans des eaux profondes, où jusqu'à présent on n'a pu employer que des bateaux à roues. Une autre conséquence de cette réduction est, toutes

choses égales d'ailleurs, de diminuer les chances d'émersion des ailes d'hélices, de sorte que les bâtiments mus par des turbines auraient une meilleure tenue à la mer, et les emballements de machine seraient rendus moins fréquents.

En ce qui concerne la simplicité et l'économie d'installation, il est certain que la conduite des machines est rendue plus facile par la moindre surveillance à exercer, et de ce fait exige un personnel mécanicien moins nombreux; mais quant à l'économie, les données ne paraissent pas actuellement suffisamment précises pour se prononcer d'une façon absolue, car tout en admettant que les turbines doivent être moins coûteuses, il faut faire entrer en ligne de compte le rendement des appareils, les frais d'entretien et la dépense de combustible.

Certains autres avantages, que nous n'avons pas indiqués, sont néanmoins très appréciables, par exemple la position des machines tout au fond du bâtiment, ce qui est évidemment un avantage, car les machines sont mieux protégées contre les projectiles et l'abaissement du centre de gravité procure une plus grande stabilité.

En outre, la suppression du graissage dans la vapeur a pour effet de supprimer les traces d'huile, qui malgré les filtres dégraisseurs, passe néanmoins en petite quantité dans la conduite d'eau d'alimentation, ce qui constitue une cause d'usure pour les chaudières. Par suite, il n'y a plus à craindre la décomposition de l'huile aux températures élevées dans le cas de l'emploi à une très haute pression.

Du côté des inconvénients, il en est un de la plus haute importance, mais sur lequel on ne peut encore se prononcer bien nettement, car les avis ne sont pas identiques sur cette question. D'après M. Parsons, la turbine à vapeur fournit avec moins de dépense plus de travail qu'une machine marine ordinaire de même poids : la vitesse obtenue est beaucoup plus grande, bien que la consommation de vapeur par cheval indiqué soit moindre, ou tout au plus égale à celle des meilleures machines à triple expansion actuelles. Ainsi, la consommation par cheval-heure réalisée à la machine ne serait que de $0^{kg},900$, chiffre fixé d'après les essais que nous avons rappelés dans ce chapitre.

Dans tous les cas, le fonctionnement des turbines motrices sur les navires ne peut être comparé au point de vue économique à

celui des turbines installées à terre, si on ne marche plus à la puissance maximum prévue. C'est qu'en effet, à bord, aux différentes vitesses du bâtiment correspondent des nombres de tours différents des machines, et par suite aux allures réduites on sera conduit à diminuer la pression, ce qui est une mauvaise condition pour le rendement économique du moteur. Dans les turbines à terre, au contraire, si la résistance diminue, la machine peut continuer à marcher au même nombre de tours en réduisant seulement le débit de vapeur sans toucher à la pression; le rendement économique peut alors rester assez satisfaisant. On peut donc affirmer d'une façon presque certaine qu'aux faibles allures, le rendement des turbines sera diminué, à moins qu'un accroissement de rendement des propulseurs ne vienne compenser cette infériorité. Mais en l'état actuel de la question il paraît certain que, dans tous les cas, la consommation de charbon par mille parcouru sera supérieure à celle que donneraient des machines ordinaires à triple expansion.

Un autre point sur lequel on n'est pas encore parfaitement fixé, c'est la question d'endurance des turbines motrices. On ne peut en effet se baser sur les bonnes qualités dont paraissent avoir fait preuve les turbines à terre, car les installations à bord ne sont plus du tout comparables à celles-ci. Sur les navires, les turbines actionnent de longues lignes d'arbres qui, avec les grandes vitesses angulaires observées, tendent à se déformer et il faut que les coussinets aient assez de jeu et soient assez flexibles pour permettre ces mouvements tout en atténuant les vibrations. Si certaines précautions spéciales ne sont pas prises pour empêcher les jeux de s'accentuer, il peut en résulter pour les arbres des efforts de flexion considérables dus à la poussée des hélices et on peut avoir à craindre des ruptures. Quant à la construction des turbines par elles-mêmes, on est arrivé, par l'emploi de métaux très résistants, à un degré de perfection tel qu'il n'y a pas lieu d'avoir à redouter les ruptures produites par la force centrifuge.

En résumé, l'application des turbines à vapeur employées comme moteurs à bord des navires paraît convenir, quant à présent, aux petits bâtiments tels que des torpilleurs, qui ont surtout besoin de grandes vitesses et pour lesquels la légèreté des appareils permet seule d'installer des chaudières plus puissantes capables de réaliser ces grandes vitesses. Les torpilleurs de défense

des côtes ont en général à fournir des courses assez limitées pour qu'on puisse accepter les conséquences de l'approvisionnement de charbon avec des appareils moins économiques que les machines actuelles. Au contraire, sur les navires devant fournir de longues courses à allure réduite, l'emploi des turbines à vapeur ne semble pas être avantageux, car la dépense de charbon par mille parcouru ne serait pas dans ce cas compensée par le bénéfice de poids résultant de la légèreté des appareils.

Il est possible aussi que, dans un avenir prochain, on arrive à installer des turbines motrices sur des transports, même s'ils ont à parcourir de longues distances, car les conditions de marche, presque toujours à l'allure maximum, sont plutôt favorables à ce genre de moteurs.

En résumé, et si nous nous en rapportons à l'opinion formulée par des ingénieurs compétents, tels que MM. Joubert et Hart, s'il faut encore être prudent dans l'extension du système à des navires de très fort tonnage et à très grande vitesse, en raison des problèmes secondaires qui peuvent se poser, il y a tout lieu d'espérer cependant que, grâce à l'ardeur avec laquelle on étudie actuellement la question dans différents pays, ces inconvénients parviendront à être diminués sinon supprimés et que, dans un avenir prochain, les turbo-moteurs, vu leur absence de vibrations, se répandront de plus en plus dans la navigation, comme ils sont en train de le faire dans nombre d'applications industrielles sur la terre ferme.

CHAPITRE XI

La Turbine Rateau et ses applications.

M. Rateau est un ingénieur qui, entre autres inventions des plus remarquables, a créé des types de turbines à vapeur dénotant une étude approfondie des questions très complexes que soulève la construction de ces machines encore à leurs débuts. En 1900, il a réalisé, avec le concours de la maison Sautter, Harlé et Cie une turbine de 250 chevaux fonctionnant avec de la vapeur à la pression atmosphérique et qui actionnait deux dynamos à courant continu pour distribution à trois fils. On peut dire que ce moteur original est appelé à faire une petite révolution dans les procédés d'utilisation de la vapeur, et, à ce titre, nous devons lui consacrer un chapitre dans cette revue des turbo-moteurs de toute espèce.

Jusqu'à nos jours on avait considéré, en effet, qu'après les multiples détentes dans des cylindres appropriés, il ne restait plus pour obtenir le maximum de rendement de la vapeur des chaudières qu'à employer un bon condenseur. M. Rateau a pensé qu'entre le dernier cylindre et le condenseur, il y avait place encore pour un appareil et cet appareil est la turbine à basse pression dont il est l'inventeur.

Voici comment il envisage l'application de cette idée.

Supposons une machine d'extraction d'un puits de mine. Ces appareils, comme on le sait, ont un rendement des plus mauvais en raison même de l'extrême variation de travail qu'elles ont à fournir, depuis l'instant où la cage quitte le fond du puits jusqu'au moment où elle arrive au jour. On recueille alors la vapeur d'échappement de cette machine dans un *accumulateur de vapeur* formé de cylindres verticaux, où le flux, irrégulier au sor-

tir de la machine d'extraction s'uniformise. Puis il place sa turbine, calée sur l'arbre même des dynamos, entre cet accumulateur et le condenseur.

La turbine fonctionne ainsi entre une pression d'amont de $0^{kg},9$ absolus par centimètre carré et le vide au condenseur, qui sera d'environ 65 centimètres de mercure. C'est dans ces conditions qu'elle doit fournir 250 chevaux électriques aux bornes des dynamos, en tournant à 1.500 tours par minute et avec une consommation de vapeur de 4.000 à 4.500 kilogrammes par heure. A vide, le moteur fonctionne sous une différence de pression entre l'amont et l'aval, de 3 centimètres de mercure seulement.

Dans les installations de puits de mine ordinaires, l'on a généralement assez de vapeur pour pouvoir alimenter deux ou trois groupes, quelquefois même quatre groupes analogues à celui-ci. On pourrait donc se créer un supplément de puissance électrique s'élevant de 500 à 1.000 chevaux par puits de mine, et cela, sans nouvelle chaudière et sans consommation sensible de combustible.

Il est vrai de dire cependant que l'on sera tenté avec cet appareil de ne pas pousser la détente aussi loin qu'auparavant, le rendement de la turbine ne peut, en effet, qu'être amélioré par l'abandon au profit de celle-ci de quelques centimètres de pression. Mais la question a si peu d'importance dans les mines notamment que l'on ne doit pas s'y arrêter.

On arrivera donc par cette ingénieuse disposition qui ne tardera pas à se généraliser, à ne considérer dans l'installation d'un puits de mine, que la dépense de vapeur de la machine d'extraction, tous les autres services tels que compresseurs, ventilateurs, criblage, éclairage, etc., devant être alimentés par le courant électrique, engendré par la vapeur d'échappement de cette machine.

Si cette dernière est arrêtée pour une raison quelconque, la turbine qui assure les autres services peut être alimentée directement par la vapeur des chaudières au moyen d'un détenteur automatique spécial.

Au premier rang des applications réalisées à l'aide de cet appareil, il faut placer celle qui en a été faite à la navigation.

On a suivi avec un très vif intérêt dans la Marine Française les expériences entreprises en Angleterre au moyen de turbo-moteurs

et on s'est préoccupé également dans notre pays de l'utilisation de ces machines pour la propulsion des navires. Les recherches persévérantes de M. Rateau ont contribué dans une large mesure à mettre cette application à l'ordre du jour, car cet habile ingénieur a étudié expérimentalement toutes les données du problème dont il a établi les formules rationnelles en calculant un abaque indiquant la consommation théorique d'un turbo-moteur supposé

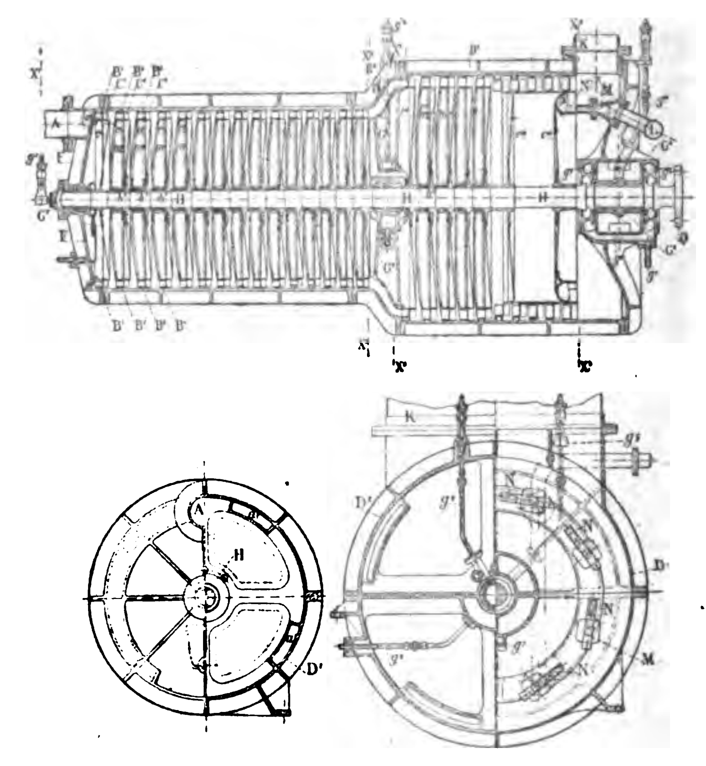


Fig. 89, 90 et 91. — Coupe d'une turbine Rateau.

parfait et fonctionnant entre une pression d'amont et une pression d'aval déterminées. C'est d'après ces recherches que l'on a construit la turbine dynamo mentionnée plus haut, modèle qui a été essayé d'une façon méthodique dans des conditions variées de pression, de charge, de vitesse, de nombre de tuyères, etc... Il a fallu toutefois se préoccuper de diverses questions très importantes, telles que : le calcul et la construction de disques mobiles

devant supporter de grandes vitesses de rotation, l'équilibre parfait de ces disques, le frottement de ces disques sur la vapeur qui les entoure, le graissage automatique des paliers et des engrenages, etc...

Le disque mobile est formé d'une seule pièce en acier spécial forgé. Les ailes sont découpées à la fraise dans la jante de ces disques; elles ont en coupe la configuration d'un ω formé par deux arcs de cercle contigus. Cet aubage, qui a été définitivement adopté après de nombreux essais offre l'avantage d'avoir des ailes courtes et épaisses et par suite très robustes. Dans leur partie centrale, devant les jets de vapeur, les ailettes sont taillées en biseau. A cause des vitesses considérables du disque, on a tenu à le faire d'un seul morceau, ce qui offre plus de sécurité que s'il était composé de plusieurs pièces assemblées entre elles, car les déplacements relatifs des diverses parties les unes par rapport aux autres qui pourraient se produire, si petits qu'ils soient, pourraient occasionner un décentrage du disque. Il importe aussi de réaliser un équilibrage parfait du disque, car avec des vitesses aussi considérables, qui donnent aux forces centrifuges à la jante une énergie énorme par rapport au simple poids il suffirait de 1 gramme de balourd à la périphérie pour produire sur un arbre rigide un effort assez considérable d'après lequel on voit qu'un poids de 1 gramme placé à la périphérie d'un disque de $0^m,16$, tournant à 24.000 tours par minute est sollicité par une force centrifuge de 50 kilogrammes.

D'autre part, d'après la formule des volants qui donne la fatigue du métal dans la section transversale de la jante, en fonction du poids spécifique du métal et de la vitesse linéaire v à la jante, on constate qu'à la vitesse linéaire de 150 mètres par seconde, l'acier travaille à 28 kilogrammes par millimètre carré, et à 300 mètres par seconde, ce chiffre s'élève à 72 kilogrammes, qui dépasse ce qu'on peut exiger des meilleurs aciers. Il est donc indispensable, quand on doit atteindre cette dernière vitesse, quelquefois même dépassée avec un seul disque, de faire concourir la partie centrale du disque à la résistance de l'ensemble; c'est pourquoi il convient d'augmenter progressivement l'épaisseur vers le centre.

La vapeur est lancée sur la périphérie du disque par une ou plusieurs tuyères. Elle est séparée en deux courants par l'arête tranchante des ailes et chacune des moitiés est rejetée par un ori-

fice dans deux compartiments latéraux, d'où elle se rend au tuyau d'échappement. Les jets de vapeur sont ainsi divisés symétriquement par la roue mobile, de sorte que la poussée des jets s'exerce rigoureusement dans un plan perpendiculaire à l'axe. Les tuyères sont placées à la partie inférieure afin que la poussée de la vapeur compense le poids du disque ; de plus, par suite de l'absence de poussée latérale, elles ont pu être réunies toutes en un groupe dans un même plan. Ces tuyères peuvent être successivement fermées à la main au moyen d'un dispositif consistant en une simple aiguille manœuvrée par un volant à vis.

L'arbre du disque repose sur un ou plusieurs coussinets, mais le disque mobile est monté en porte-à-faux au bout de l'arbre afin que la flexibilité de celui-ci lui permette de se centrer facilement pendant le mouvement de rotation. Un coussinet en graphite est néanmoins situé à l'extrémité de l'arbre avec un millimètre de jeu ; il ne sert qu'à limiter de trop fortes vibrations de l'arbre dans le cas où elles viendraient à se produire. Cette disposition semble préférable à celle consistant à faire reposer l'arbre sur trois paliers.

Pour la marche arrière, un disque supplémentaire est placé à l'extrémité de la machine du côté de l'échappement.

Quand on veut mettre le turbo-moteur en marche, on ouvre un robinet disposé à l'entrée du petit cylindre ; pour stopper, on ferme ce robinet. Pour la marche arrière, le robinet du petit cylindre étant fermé, on ouvre un robinet spécial placé à l'arrière et la vapeur pénètre dans le disque déterminant ce sens de marche.

Le nombre de tours par minute prévu avec ce moteur est de 1.800 environ. Le travail disponible sur l'arbre de chaque turbine est d'environ 900 chevaux.

Les engrenages de transmission, à doubles dents hélicoïdales sont enfermés dans un carter en fonte ayant pour but de les mettre à l'abri de la poussière. Les dents sont taillées avec une très grand précision et le pignon a une assez grande longueur, afin d'augmenter la douceur de l'engrènement. Ce pignon, qui peut faire jusqu'à 250 et 300 tours par seconde, est solidaire d'un arbre creux à l'intérieur duquel passe l'arbre de la turbine ; les deux arbres sont réunis par un manchonnage conique. Cette disposition a pour but d'empêcher que les vibrations des engrenages, presque inévitables, ne se transmettent au disque mobile.

Un des points les plus délicats dans les turbines à vapeur consiste dans la garniture étanche qui doit exister à l'endroit où l'arbre traverse le fond de la boîte dans laquelle tourne la turbine; c'était une grande difficulté que de pouvoir obtenir une garniture étanche pour un arbre tournant à une vitesse dépassant parfois 300 tours par seconde. Il importe, en effet, d'empêcher à l'endroit considéré une fuite de vapeur, vers l'extérieur, lorsque la pression intérieure est plus élevée que la pression atmosphérique, et surtout une rentrée d'air lorsque, au contraire, l'appareil marchant à condensation, la pression à l'intérieur est inférieure à la pression atmosphérique; car cette rentrée d'air gênerait le fonctionnement du condenseur et nécessiterait une pompe à air plus forte. Malgré la difficulté; le dispositif adopté, après de nombreux essais sur des systèmes divers, a donné toute satisfaction.

Le graissage est obtenu d'une manière continue au moyen d'une pompe centrifuge qui remonte continuellement l'huile dans une boîte située à la partie supérieure, d'ou elle se répand aux divers paliers.

Quant à la régulation des machines, on a appliqué dans un très grand nombre de cas la disposition en usage depuis longtemps dans les ateliers Sautter et Harlé, qui consiste en une valve cylindrique reliée avec un régulateur centrifuge par l'intermédiaire des leviers et d'une tringle articulés sur des couteaux.

Les dispositions que nous venons d'examiner sont des dispositions assez générales, mais néanmoins susceptibles de modifications de détails suivant le genre de turbine appropriée en vue d'un travail spécial, tel que: conduite de dynamo, de ventilateur ou de pompe centrifuge.

Les turbines destinées à conduire directement les hélices sont, comme nous l'avons dit, à disques multiples, et diffèrent des précédentes. La turbine à disques multiples, se compose d'une série de turbines élémentaires renfermées dans une boîte cylindrique de deux diamètres différents, montées côte à côte et clavetées sur un arbre horizontal reposant sur trois paliers. La vapeur arrive par le tuyau du fond et passe par des canaux qui l'amènent aux premières directrices; ces directrices la projettent sur la première roue mobile et après avoir traversé cette roue, la vapeur se rend aux directrices de la seconde roue mobile, puis dans cette roue et ainsi de suite jusqu'à l'échappement.

La section des canaux distributeurs augmente graduellement au fur et à mesure que se produit la détente de la vapeur. Le diamètre des dix dernières roues est augmenté pour éviter d'exagérer la longueur radiale des aubes, et pour augmenter aussi la vitesse à la périphérie. La vapeur passe de la dernière des petites roues à la première des grandes par des canaux. Les ailettes des roues sont en acier et ont la forme d'un arc de cercle simple; elles sont rivées sur la jante d'une tôle emboutie à la presse hydraulique. Les cinq dernières couronnes d'aubes mobiles sont fixées sur un tambour cylindrique qui, par suite de la différence des pressions exercer par la vapeur sur ses deux faces reçoit une poussée longitudinale qui compense celle des hélices actionnées par la turbine.

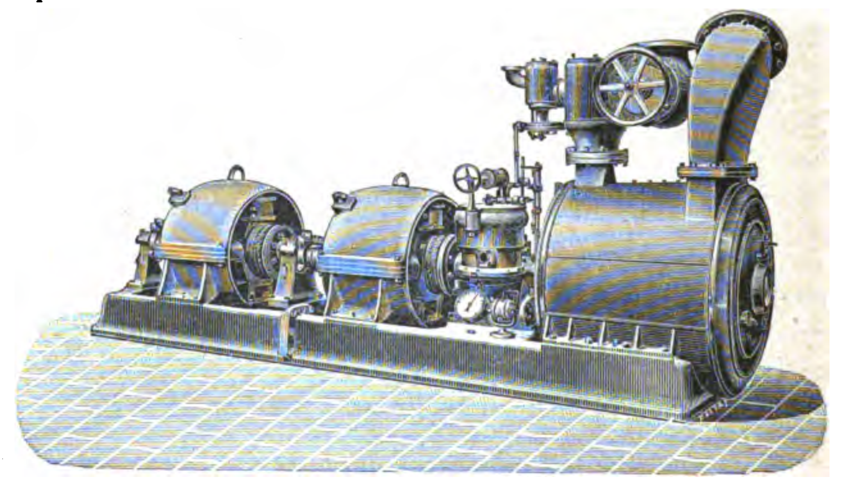


Fig. 92. — Turbine à vapeur Rateau, accouplée à une dynamo Sautter-Harlé.

Les distributrices sont attachées à une couronne rivée à des diaphragmes *nn*, munis dans la partie centrale de coussinets qui ne touchent pas l'arbre, mais laissent autour de lui un jeu aussi faible que possible; cette disposition permet à la vapeur de passer presque sans fuites par les distributeurs.

A l'extrémité aval de la turbine, il existe une couronne d'aubes disposées en sens inverse de celle des autres roues, et fixées sur la face interne d'un tore en acier; cette couronne reçoit la vapeur du tuyau par des ajutages. Quand on veut renverser la marche de la machine, il suffit d'ouvrir une vanne placée sur ce tuyau.

Le graissage s'affectue sous pression au moyen d'une petite pompe à huile auxiliaire; le palier d'aval reçoit l'huile dans une couronne annulaire qui entoure le tourillon, de façon que l'huile constitue un joint liquide qui empêche les rentrées d'air au condenseur.

Dans ce système de turbines, les constructeurs se sont préoccupés de diminuer le plus possible les jeux entre les parties fixes et les parties mobiles à l'endroit des distributeurs, de façon à réduire les fuites de vapeur. Il est indispensable, en effet, pour obtenir une bonne utilisation de la vapeur que les fuites n'atteignent pas une trop grande importance par rapport à la quantité utile qui s'écoule par les distributeurs; mais il est indispensable aussi de laisser un jeu d'au moins 1 millimètre entre les parties fixes de l'enveloppe et les parties tournantes, à cause des dilatations et pour tenir compte de l'usure des coussinets.

M. Rateau a fait remarquer que pour une turbine de plus de 1000 chevaux, la section d'écoulement par les premiers distributeurs ne dépasse pas 20 centimètres carrés dans les conditions ordinaires de pression, et que 1 millimètre de jeu seulement donne une section de fuite de plus de 20 centimètres carrés. D'après cela, les fuites peuvent atteindre 50 0/0 du fluide moteur, du moins pour les premières roues mobiles; ces fuites n'ont pas seulement pour effet de faire perdre l'utilisation de ces 50 0/0, elles viennent encore produire une résistance nuisible sur les roues mobiles.

Avec la disposition donnée aux diaphragmes, on parvient à réduire la section des fuites à moins de 2 centimètres carrés, tout en laissant autour des roues mobiles un jeu de 4 à 5 millimètres suffisant pour qu'aucun frottement ne soit à redouter.

D'après les expériences préliminaires, M. Rateau estime que le rendement des petites turbines dépassera 70 0/0, et que les pertes externes par frottement des disques sur la vapeur et par fuites ne s'élèveront pas, pendant la marche en pleine charge à plus de 10 ou 12 0/0 de la puissance développée, en sorte que le rendement net, c'est-à-dire le rapport entre la puissance effective disponible sur l'arbre et la puissance théorique de la vapeur, atteindra environ 65 0/0.

Dans ces conditions, pour une pression d'amont de 13 kilogrammes par centimètre carré (pression absolue) par exemple,

et pour une contre-pression au condenseur de 0,1 (vide de 60 centimètres de mercure) la consommation de vapeur serait d'environ $5^{kg},700$ par cheval effectif sur l'arbre. (Ce chiffre est relevé d'après l'abaque.)

Avec des unités de grande puissance tournant relativement plus vite, M. Rateau ne croit pas impossible d'atteindre 70 0/0 de rendement net. Dans ce cas, et dans les mêmes conditions que ci-dessus, la consommation de vapeur serait encore réduite à $5^{kg},2$ par cheval effectif.

Ajoutons enfin que le poids total d'une turbine de 1.200 chevaux de ce système n'atteint pas 3.500 kilogrammes, soit 3 kilogrammes par cheval. Et en modifiant légèrement la construction, on peut faire développer à ce turbo-moteur jusqu'au double de la force nominale, soit 2.400 chevaux, ou $1^{kg},4$ par cheval effectif!

Le premier navire français qui ait été muni d'une turbine Rateau est le torpilleur de première classe n° 243 ; le second est la vedette torpilleur *Libellule*. L'appareil moteur de ce torpilleur se compose de deux turbines à vapeur à disques multiples actionnant chacune un arbre sur lequel sont montées trois hélices, soit six au total. Chacun de ces moteurs se compose de deux cylindres de diamètres différents reliés par un raccord conique; le petit est en acier, le grand en fonte. Ces deux cylindres sont traversés suivant leur axe par un arbre qui porte la série des disques mobiles, séparés les uns des autres par des diaphragmes fixes; ceux-ci portent à leur périphérie une série d'ailettes fixes formant distributeurs pour la vapeur, tandis que la périphérie des disques mobiles est munie d'ailettes d'une forme particulière. Ces ailettes, fixes et mobiles, sont calculées de manière à obtenir la meilleure utilisation possible de la puissance de la vapeur agissant par sa vitesse. La vapeur pénètre dans la turbine par l'extrémité du petit cylindre, ainsi que nous l'avons dit plus haut, et sort par l'extrémité du grand cylindre pour se rendre ensuite au condenseur.

Utilisation des vapeurs d'échappement intermittentes. — M. Rateau a également préconisé l'emploi des vapeurs d'échappement intermittentes provenant des machines d'extraction des mines ou des moteurs reversibles de laminoirs, au moyen d'un accumulateur de vapeur et d'une dynamo-turbine interposés entre la machine primaire et le condenseur. L'un des points sur lesquels

l'auteur insiste le plus est la combinaison éventuelle de son système avec les condensations centrales, combinaison qui, loin d'être désavantageuse à l'adoption de ce dispositif, est au contraire tout indiquée.

La première application, qui a été faite aux mines de Bruay (Pas-de-Calais) utilise précisément une condensation de ce genre, et a permis de recueillir moyennant une dépense de premier établissement relativement modérée, une force motrice additionnelle de 300 chevaux électriques, grâce à la récupération d'une énergie qui était jusqu'alors entièrement perdue.

Voici, d'après la *Revue industrielle*, quelques détails relatifs à cette installation :

D'une façon générale, le système Rateau consiste à accumuler en premier lieu, dans un appareil approprié dans ce but, les flux d'échappement discontinus des machines à vapeur à marche intermittente, de façon à obtenir, à la sortie de cet appareil, un flux de vapeur régulier, utilisé ensuite dans un moteur secondaire, en l'espèce une turbine à vapeur à basse pression fonctionnant avec échappement au condenseur. Ce dispositif permet donc d'appliquer aux machines à marche intermittente tout le bénéfice de la marche à condensation, en recueillant mécaniquement l'énergie considérable que l'échappement libre de ces machines emportait jusqu'ici sans profit dans l'atmosphère, et l'on peut penser que cette idée est susceptible de fructueuses applications.

Négligeant la description de l'accumulateur des vapeurs perdues combiné par M. Rateau et qui ne présente pas d'importance dans le sujet traité au cours du présent ouvrage, nous nous bornerons à parler ici du turbo-moteur utilisant ces vapeurs.

On conçoit qu'il est absolument indispensable que le fonctionnement de ce moteur soit aussi régulier que possible et qu'il reste indépendant des variations de pression de l'accumulateur. Cette obligation est remplie par une vanne de détente K soumise à l'action automatique d'un régulateur à force centrifuge. Il faut également que le turbo-moteur à basse pression puisse continuer à s'alimenter en vapeur dans les moments où l'extraction subit un arrêt plus ou moins prolongé. En conséquence on a placé en amont de cette première vanne un second détendeur automatique, qui laisse arriver directement par la conduite la vapeur vive des chaudières dès que celle de l'accumulateur

n'arrive plus en quantité suffisante. Ce détendeur automatique s'ouvre dès que la pression dans l'accumulateur tombe à une certaine limite inférieure qu'on fixe d'avance, par exemple, la pression atmosphérique.

La machine secondaire se compose, à Bruay, d'une turbine à vapeur du système Rateau, à action et à roues multiples actionnant deux dynamos à courant continu, alimentant 2 ponts de 250 volts chacun, calées toutes deux sur l'arbre de la turbine et installées sur un bâti commun. L'avantage que présentent sur les machines à pistons les turbines à vapeur, pour l'utilisation des basses pressions, est considérable et résulte en pratique du moindre encombrement de ces machines ainsi que de l'importance très réduite de leurs pertes, c'est-à-dire de leur très grande supériorité de rendement dans ces conditions particulières de fonctionnement.

C'est ainsi que l'ensemble de la turbine et de ses deux dynamos, pour une puissance d'environ 300 chevaux, se loge dans un espace de 5 mètres de longueur, $1^{m},40$ de largeur et 2 mètres de hauteur, en y comprenant les vannes d'admission de vapeur.

Quant au rendement économique d'une turbine à vapeur à basse pression, il s'élèvera à 60 ou 70 0/0, suivant sa puissance, tandis que le rendement d'une machine à pistons, placée dans les mêmes conditions, dépasserait difficilement 35 à 40 0/0, si l'on en juge par le rendement très médiocre que réalisent en pratique les cylindres à basse pression des machines à triple expansion.

Avantages économiques. — L'avantage qui résulte de cette manière d'utiliser les vapeurs d'échappement est de toute évidence, puisque la puissance additionnelle recueillie se trouve produite sans aucune dépense nouvelle de combustible, sauf dans les périodes d'arrêt de la machine primaire, pendant lesquelles la turbine est obligée de s'alimenter directement aux chaudières. Encore peut-on remarquer que la dépense de charbon, qui correspond à ces appels de vapeur vive, ne saurait augmenter de façon aussi sensible la consommation courante des foyers déjà nécessitée par le maintien général de la pression. De plus, par l'accumulation de la vapeur, on évite l'emploi des chauffeurs qu'il eût fallu, sans cela, adjoindre au personnel existant pour produire la même énergie additionnelle. Et, d'autre part, on réalise dans les frais de premier établissement du groupe générateur d'importantes éco-

nomies, puisque les chaudières, que l'on aurait eu de ce chef à installer, eussent été notablement plus coûteuses que l'accumulateur lui-même. Cette économie s'augmente même de ce que les turbines coûtent sensiblement moins cher de prix d'achat et surtout d'installation que des machines à pistons.

Premiers résultats obtenus. — L'installation qui a été faite à la fosse n° 5 des mines de Bruay comporte une turbine-dynamo de 300 chevaux-électriques nets, construite dans les ateliers Sautter-Harlé et Cie, à Paris, et un accumulateur en trois capacités, composé sur place avec d'anciens corps de chaudières et renfermant en totalité 30 tonnes environ de cuvettes en fonte. Les résultats obtenus dans cette première installation ont montré, depuis le mois d'août, que l'accumulateur fonctionne comme il avait été prévu. La turbine travaille normalement en absorbant de 4.000 à 5.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, fournis uniquement par la machine d'extraction. Les résultats ne sont cependant pas encore ce qu'ils devraient être, puisque l'on n'a pu jusqu'ici utiliser qu'une force de 200 chevaux, au lieu des 300 dont la turbine est capable, et que la vitesse de celle-ci éprouve, d'autre part, des variations un peu plus fortes qu'on ne l'avait d'abord pensé, quoique cependant inférieure à 3 0/0.

Si la puissance développée n'est actuellement pas plus élevée, cela n'est pas imputable au rendement du nouveau système, mais uniquement à ce que la turbine rejette sa vapeur dans un condenseur central dont le vide est insuffisant.

Les fluctuations de la vitesse résultent de ce que les variations de la pression dans l'accumulateur atteignent $0^{kg},40$ par centimètre carré au lieu des $0^{kg},25$ que M. Rateau admet comme étant le plus convenable. Elles proviennent donc en fait de ce que le volant de chaleur de l'accumulateur est trop faible; et cette insuffisance provient elle-même en majeure partie de ce que la machine d'extraction ne livre de vapeur que pendant 15 à 20 secondes, tandis qu'on avait admis pour le calcul de l'accumulateur une durée d'émission de 30 secondes. En ajoutant 10 tonnes de fonte aux 30 tonnes que contient déjà l'appareil, on placera l'installation nouvelle dans les conditions générales qui avaient été prévues pour son fonctionnement parfait.

Bien que ces conditions normales soient donc, quant à présent, imparfaitement réalisées, et que la puissance demandée à la tur-

bine présente, d'autre part, des variations incessantes et considérables, les résultats effectivement obtenus par l'installation de Bruay paraîtront, pensons-nous, très intéressants. Ces résultats peuvent être résumés comme suit pour deux séries consécutives d'observations faites en marche courante:

Pression d'amont de la turbine en *kg.* par cm^2. . . . . . P	0.85	0,89
Pression d'aval de la turbine en *kg.* par cm^2 . . . . *p*	0,23	0,266
Vide en *cm* de mercure. . . .	59 »	56 »
Débit total de vapeur à l'heure en *kg.* I	4700 »	4950 »
Vitesse en tours par minute . *n*	1570 »	1620 »
Puissance développée en chevaux-électriques . . . . Te	195 »	198 »
Consommation effective de vapeur par cheval-heure en *kg.* . K'	24,200	25 »
Consommation théorique par cheval-heure électrique en *kg.* . K	13,100	14,150
Rendement global de l'installation.	0.542	0,565

Les chiffres de la première colonne correspondent au diagramme des pressions dans l'accumulateur.

Le tableau suivant montre que les variations de voltage ne sont tout au plus que de 5 volts sur 250, soit de 2 0/0, ce qui est en somme assez pour une semblable installation, fonctionnant dans des conditions aussi dures.

Puissance électrique recueillie sur les deux ponts :

	247 *v* { 270 *a* / 270	248 { 290 / 388	250 { 290 / 300	245 { 230 / 280
Pression dans l'accumulateur . . . *k*	1,38	1,025	1,025	1,38
Pression à l'amont de la turbine. . . *k*	0,80	0,83	0,90	0,81
Vide au condenseur en cent. de mercure. .	59,3	59,2	58,9	59,0
Température de l'eau au condenseur { entrée.	24°			25°
Température de l'eau au condenseur { sortie .	41°			43°

La comparaison entre les résultats précédents et ceux qu'on a relevés lors des essais en usine, sur le groupe à basse pression, dont il vient d'être question, est intéressante à faire.

En fonctionnant à la même vitesse de 1.600 tours, mais avec une pression à l'aval de 0,16 kilogramme par centimètre carré, et développant une puissance de 275 chevaux, la turbine de Bruay avait montré un rendement global de 55 0/0, s'accordant par conséquent avec les rendements relevés en marche industrielle.

A 1.800 tours, ce rendement atteignait d'ailleurs 58 0/0, et il eût atteint 64 0/0 à la vitesse de 2.500 tours, que les conditions d'établissement des dynamos empêchaient d'ailleurs d'obtenir, mais qui pourrait être adoptée pour une autre installation.

Ces divers rendements correspondent au rapport de la puissance réellement recueillie aux bornes des dynamos, à l'énergie théoriquement contenue dans la vapeur consommée pour la chute de pression considérée, c'est-à-dire qu'ils tiennent compte de toutes les pertes internes ou externes de la turbine et des dynamos.

Dans ces utilisations de vapeurs à basse pression, il y a évidemment un très grand intérêt à employer des condenseurs donnant le vide le plus parfait possible.

Après plusieurs mois de marche courante, de nouveaux essais viennent d'être faits à Bruay avec un vide atteignant cette fois 65 centimètres de mercure. Dans ces conditions, la consommation de vapeur de la turbine est ressortie aux 3/4 de la charge normale, à 17 kg. 8 par cheval-heure électrique, et le rendement global à 55 0/0. Le service encore incomplet de la fosse 5 de Bruay ne permettait pas de demander aux dynamos une puissance plus grande que 241 chevaux électriques, inférieure par conséquent à la puissance normale de 300.

Les résultats obtenus dans ces essais montrent qu'après cinq mois de service la turbine de Bruay réalise, en marche industrielle, des consommations de vapeur et des rendements globaux parfaitement conformes à ceux qui avaient été relevés dans les ateliers Sautter-Harlé, pour des puissances et des pressions correspondantes. Ces derniers essais avaient en effet donné, dans ces conditions, les résultats suivants [1] :

1. La *Revue Industrielle*, 1903, Op. cit.

Nombre de tours	Chevaux électriques produits	Pression d'entrée	Pression à l'échappement	Consommation de vapeur par cheval-heure électrique	Rendement global
		kg	kg	kg	
1600	192	0,659	0,128	19,1	0,530
1610	253	0,845	0,156	18,4	0,547
1591	275	0,902	0,163	18,0	0,531
1605	316	1,010	0,177	18,05	0,534
1800	336	1,010	0,184	16,95	0,580
Or les essais sur place faits à Bruay ont donné :					
1610	192	0,750	0,144	19,3	0,550
1610	253	0,820	0,141	18,7	0,545

La consommation de vapeur du groupe électrogène peut être, comme on l'a vu, estimée pour la pleine charge, à 16 ou 18 kilogrammes par cheval-heure électrique, mesuré aux bornes des dynamos. Ce résultat est déjà satisfaisant si l'on considère qu'il s'agit d'une machine travaillant au-dessous de la pression atmosphérique et utilisant, par suite, une faible chute de pression. Mais il est évidemment supérieur à ce que dépenserait, pendant les arrêts de la machine primaire, une machine absolument indépendante alimentée à haute pression par ses chaudières propres. Il s'ensuit que, dans le cas où les périodes d'arrêt l'emporteraient sur les périodes de marche, l'avantage du dispositif se trouverait réduit sensiblement. Or, bien que ce cas soit pratiquement exceptionnel, M. Rateau indique deux moyens de réduire, même alors, les consommations au stricte minimum. Le premier consiste à ajouter à la turbine BP une turbine HP alimentée en vapeur vive pendant les périodes d'arrêt, le corps BP recevant alors sa vapeur de l'accumulateur pendant les périodes de marche de la machine d'extraction, et du corps HP pendant ses périodes d'arrêt. Le second consiste à relever simplement la pression d'échappement du moteur primaire, ce qui améliorerait notablement les conditions économiques de marche du turbo-moteur, sans modifier les conditions de fonctionnement de la machine d'extraction. Ce serait même la disposition la plus rationnelle à donner à une installation entièrement nouvelle.

Il résulte en somme de ces différents chiffres que ce mode d'utilisation des vapeurs d'échappement permet d'obtenir le cheval-

heure électrique moyennant une consommation de vapeur (jusqu'alors perdue) d'environ 18 kilogrammes à pleine charge, correspondant à un rendement global de la turbine-dynamo de 55 0/0. M. Rateau fait toutefois remarquer que ces résultats sont atteints avec une vitesse de rotation très modérée et avec un vide de 65 centimètres de mercure seulement, et qu'ils sont dès lors susceptibles d'une notable amélioration. C'est ainsi qu'il suffirait d'un vide de 70 centimètres parfaitement réalisable avec un bon condenseur, et d'une légère augmentation de la vitesse de rotation, pour atteindre, avec un rendement global de 60 0/0, une consommation par cheval-heure électrique, de seulement 12 kilogrammes. Or une telle consommation devient très comparable à celle des groupes électrogènes qui utilisent dans les usines la vapeur à haute pression.

Depuis cette époque, M. Rateau a réalisé de nouvelles applications de ses turbines et, à l'exemple de Parsons, il les a montées sur des navires et appliquées à la propulsion. Il paraît avoir beaucoup mieux réussi que ses devanciers, et les résultats obtenus sont très remarquables. Nous les résumerons ici d'après une étude de l'*Institution of naval architects*, reproduite par le *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale* d'avril 1904.

« Il existe actuellement, dit le *Bulletin*, deux navires pourvus de turbine Rateau : le torpilleur français n° 243 et un torpilleur de première classe construit par Yarrow en Angleterre, mais ce dernier seul a été construit suivant les idées de M. Rateau ; les restrictions apportées pour ses hélices ont empêché d'obtenir des résultats satisfaisants avec le bateau français n° 243, bien qu'il ait pu atteindre des vitesses de 21 nœuds au lieu des 20 prévus et spécifiés. Le modèle de Yarrow est, au contraire, disposé de manière à permettre de tirer le meilleur profit des turbines, et il est, en outre, pourvu d'une petite machine à pistons permettant de fonctionner économiquement aux faibles vitesses.

« Cet accouplement de moteur à piston auxiliaire avec les turbines fournit la solution des principales difficultés de leur emploi, difficultés provenant de la grande vitesse des hélices, du faible rendement des turbines aux grandes vitesses et des changements de marche.

Les vitesses qu'il faut donner aux turbines pour en tirer le

meilleur rendement sont, en général, beaucoup plus élevées que celles que l'on peut admettre pour les hélices ; de là, la nécessité de sectionner les turbines, de grouper les hélices une à une, ou en paires sur plusieurs arbres et d'en augmenter le diamètre au-delà du pas, conditions qui diminuent le rendement total de l'ensemble, de sorte que, malgré le rendement supérieur de la turbine, le rendement de cet ensemble peut être, suivant les cas, inférieur ou supérieur à celui des types usuels de machines à pistons. Et ces difficultés s'accroissent aux faibles vitesses, car le diamètre maximum des hélices est limité par le maître couple du navire, tandis que le diamètre des turbines est déterminé non par leur puissance, mais par leur vitesse de rotation. La vitesse de la turbine diminue donc avec celle du navire, de sorte que les dimensions des turbines croissent, à mesure que leur puissance diminue, à peu près en raison inverse du cube de la vitesse. Il existe donc une limite inférieure de cette vitesse, au-dessous de laquelle les turbines cessent d'être à recommander. Cette limite se trouve aux environs de 20 nœuds, d'après M. Rateau.

« Aux faibles vitesses de rotation, le rendement des turbines diminue, c'est là un inconvénient des plus graves pour les turbines des bâtiments de guerre qui marchent souvent à faibles vitesses de 12 à 15 nœuds. On peut y remédier en partie comme l'a fait M. Parsons, par l'addition d'une turbine supplémentaire pour les petites vitesses, mais cette solution ne fait que diminuer un peu la dépense de charbon. La vraie solution est l'addition d'une machine à pistons de faible puissance pour ces faibles vitesses. D'autre part, les turbines se prêtent difficilement aux changements de marche ; on ne peut guère y parvenir, par exemple, au moyen d'aubes supplémentaires, qu'en diminuant notablement le rendement en marche avant ; il faut donc adjoindre à la turbine de marche avant un moteur de marche arrière, relativement faible et par conséquent d'une moindre efficacité dans les manœuvres. M. Parsons a, tout d'abord, employé des turbines auxiliaires enfilées sur le même arbre que les principales, mais avec l'inconvénient d'un grand encombrement en longueur.

« En 1898, M. Rateau indiqua comment on pouvait grouper cette turbine auxiliaire à l'intérieur de la principale sans en augmenter l'encombrement. Avec un seul anneau d'aubes auxi-

liaires, sur le torpilleur 243, l'on obtenait, en marche arrière, 40 0/0 de la puissance de marche avant, et l'on aurait obtenu 50 0/0 avec deux anneaux. Ces anneaux ne présentent qu'une faible résistance en marche avant, et, en marche arrière, les aubes de marche avant restent folles.

« Les turbines ne se prêtent pas à l'arrêt rapide des navires. Après que l'on a coupé la vapeur, les hélices continuent de tourner en entraînant la turbine, bien que l'on puisse en augmenter la résistance par une admission de vapeur en contre-sens. Ce manque de sûreté et de souplesse pour les manœuvres et les arrêts présente de sérieux inconvénients, principalement pour les navires de guerre, et conduira nécessairement à l'emploi combiné de machines à pistons et des turbines attelées sur des arbres indépendants de manière que le moteur à piston puisse marcher à toutes vitesses. Turbine et moteur peuvent aussi marcher en arrière, et ce avec une puissance totale d'environ 75 0/0 de celle en marche avant. La puissance du moteur auxiliaire ne doit pas être inférieure au sixième de la puissance totale, et peut en atteindre la moitié, tout en conservant les avantages suivants, malgré cette grande puissance du moteur auxiliaire.

M. Parsons a proposé de monter la machine à piston sur le même arbre que celui des turbines et de faire, aux basses vitesses, échapper la vapeur de cette machine dans la turbine de haute pression, puis à celle de basse pression et au condenseur; lorsque la vitesse dépasse celle du moteur à piston, on lui ferme la vapeur, et la turbine fonctionne seule, de sorte que la machine à pistons devient inutile précisément au moment où le travail exigé est le plus considérable. En outre, il se peut que l'on ne découple pas la machine à pistons au moment voulu, ce qui peut occasionner des accidents. Cet accouplement direct de deux moteurs faits pour des vitesses si différentes est évidemment fautif; le moteur à pistons doit être indépendant de la turbine, et actionner un arbre d'hélice à lui. Quant au trajet de la vapeur, elle peut se distribuer soit en parallèle aux deux machines, soit en série en passant du moteur à piston aux turbines, où elle complète sa détente.

« Les turbines du torpilleur 243, les premières construites par Sautter-Harlé, datent de cinq ans ; on a apporté depuis quelques perfectionnements qui réduisent notablement la dépense de

vapeur. Une turbine exactement semblable à celle de ce torpilleur a été essayée aux ateliers de MM. Sautter-Harlé, en présence des ingénieurs de la marine, en lui faisant actionner une dynamo dont on pouvait varier et mesurer exactement la puissance.

« La turbine du torpilleur *Yarrow* n'a pas encore été essayée en pleine vitesse, mais on peut prévoir, qu'à la puissance de 2.000 chevaux, et entre 1.500 et 1.600 tours par minute, son rendement sera d'environ 61 0/0. La perte par le frottement des roues dans la vapeur n'est que de 41 chevaux, ou de 2 0/0. Avec une pression 12 kilogrammes et un vide de 685 millimètres, la dépense de vapeur est de 6 kilogrammes par cheval effectif, ce qui correspond à une dépense de 5 k. 3 par cheval indiqué dans un moteur à pistons perdant 12 0/0 en frottements organiques.

« D'autres essais, exécutés sur des turbines moins importantes, ont montré que, pour des puissances variant de 300 à 600 chevaux, on peut compter sur des rendements de 60 0/0, et sur plus de 65 0/0 avec des puissances de 1.000 chevaux. Avec de la vapeur à 10 k. 5, surchauffée à 350°, et pour des puissances de 5.000 à 6.000 chevaux, on peut espérer ne dépenser que 4 k. 35 de vapeur par cheval effectif, correspondant à 3 k. 85 pour un moteur à piston d'un rendement organique de 90 0/0. Dans les meilleures conditions de marche, les machines à triple expansion peuvent atteindre des rendements de 62 0/0 ; mais, en marche normale, principalement sur les navires de guerre, la moyenne de ce rendement ne dépasserait pas, d'après M. Lelong, 55,2 0/0 ce qui donne, en le diminuant de 8 0/0 pour tenir compte des frottements, un rendement net d'environ 51 0/0, bien inférieur au rendement net de 60 0/0 des turbines en pleine puissance.

Les dimensions du contre-torpilleur *Yarrow* sont les suivantes : longueur 47 mètres, largeur 4^{m},65, déplacement 140 tonnes. Les chaudières, du type *Yarrow*, peuvent suffire à des vitesses de 26 à 27 nœuds avec des machines à pistons. Les arbres d'hélices sont au nombre de trois, commandés simultanément et séparément par deux turbines, une de haute et l'autre de basse pression, et par un moteur à pistons de 250 chevaux, attelé sur l'arbre central à une seule hélice de 1^{m},22 de diamètre. Les deux turbines, qui tournent en sens contraires, sont reliées en

série et représentées par les figures 6 et 7 ; elles ont été construites aux ateliers d'Oerlikon ; leur poids total est de 7.800 kilogrammes pour 2.000 chevaux, soit d'environ 3 k. 9 par cheval, et ce poids pourrait être réduit en diminuant l'épaisseur des enveloppes des turbines et la masse des paliers de butée, car la poussée de l'hélice est équilibrée en grande partie par celle de la vapeur. Les passages des arbres dans les turbines sont avec joints à circulation d'huile sous une pression réglée de manière à empêcher toute rentrée d'air ; le vide au condenseur est excellent, avec seulement une pompe à air au lieu des deux que l'on avait prévues ; il s'est maintenu, pendant tous les essais, à 685 millimètres.

Essai du contre-torpilleur Yarrow du 13 octobre 1903.

Numéros des essais.	I	II	III	IV	V
Pression d'admission, kil. par cm²		0k,35	3k,5	7	10
Vide au condenseur en m/m de mercure	685	710	710	689	6?5
Vitesses moyennes en nœuds	11,58	15,54	18,71	21,92	25
Tours par minute. Machines à pistons	369	411	441	475	916
— — Turbines de haute pression	393	688	955	1172	1455
— — — de basse pression	395	687	994	1357	1657
Puissances sur l'arbre. Machine à pistons	239	260	251	235	232
Glissement des hélices 0/0 : Machines à pistons 0/0	39,5	29,7	21	14	9,7
Glissement des hélices 0/0 : Turbines de haute pression		8,9	20,6	24,5	20,5
Glissement des hélices 0/0 : — de basse pression		8,9	24	35	3[illegible]

Les premiers essais ont été exécutés en octobre 1903, avec chaque arbre muni d'une hélice à trois ailes de 810 millimètres de diamètre sur 760 de pas ; les résultats en sont donnés au tableau ci-dessus. On voit que la vitesse de 25 nœuds a été atteinte bien qu'avec une pression inférieure aux 11 kilogrammes prévus. Les courbes de recul des hélices montrent que leur aire est encore suffisante à 21 nœuds, mais cesse de l'être aux vitesses supérieures ; on augmenta cette surface par l'addition d'une seconde hélice à chacun des arbres des turbines. Avec le moteur à pistons seul, et à la vitesse de 12 nœuds, le glissement de l'hélice centrale est d'environ 40 0/0, et l'eau entraîne les hélices des turbines à la vitesse d'environ 400 tours par minute. A mesure que les turbines entrent en jeu, le glissement de cette hélice centrale diminue jusqu'à 7 0/0, tandis que ceux des hélices des turbines augmentent jusqu'à 30 0/0 pour celle de la turbine de haute pression et 39 0/0 pour celle de basse pression, dont la puissance est, en raison du bon fonctionnement du condenseur, plus élevée que celle de la turbine de haute pression. De ce que le glissement de

l'hélice centrale diminue à mesure de l'intervention des turbines, sa vitesse n'augmente pas proportionnellement à celle du navire. De 12 et 25 nœuds, elle n'augmente que de 369 à 516 tours par minute, tandis que les vitesses des turbines de haute et de basse pression passent respectivement de 393 à 1.637 tours, et de 395 à 1.455 tours, par minute, au lieu des vitesses prévues de 1.500 et 1 600 tours. La dépense de vapeur, aux faibles vitesses de 10 nœuds, est probablement plus faible qu'avec une seule machine à pistons du type ordinaire.

Essais du 19 janvier 1901.

Numéros des essais.		I	II	III	IV
Pression d'admission en kil. par cm².		3,5	7	10,5	12
Vide au condenseur en m/m de mercure		710	700	685	685
Vitesses moyennes en nœuds		17,8	21,4	25	26,4
Tours par minute.	Machine à pistons	458	508	555	576
— —	Turbines de haute pression	836	1052	1207	1258
— —	— de basse pression	836	1065	1232	1307
Glissement des hélices 0/0 .	Machines à pistons	28,7	22,4	17	15,3
	Turbine de haute pression	13,6	17,4	16,4	14,8
	— de basse pression	24	28,2	27,8	27,8

Les essais du 19 janvier 1904 ont été exécutés avec une hélice centrale de diamètre réduit à 1m,07 et de même pas : 1m,67 que la précédente ; l'arbre de la turbine de haute pression avait deux hélices de 710 et 813 millimètres de diamètre, et de même pas ; celui de la turbine de basse pression avait aussi deux hélices de 710 et 865, à pas de 760 et 865 millimètres ; les résultats sont donnés au tableau ci-dessus. On voit que l'on atteint, en forçant un peu les turbines, la vitesse de 26n,39. A pressions d'admission égales, la dépense de vapeur est moindre que dans les premiers essais, sauf à la vitesse maxima, où elle est sensiblement la même. Le glissement des hélices et la vitesse des turbines sont considérablement réduits. On en conclut que le rendement des deux hélices est bien meilleur que celui des hélices uniques, puisque le rendement total est meilleur bien que celui des turbines diminue avec leur vitesse ; et, afin d'augmenter cette dernière vitesse et, ainsi, le rendement total, on a diminué, dans un troisième essai, l'aire des hélices. D'autre part, l'addition d'une seconde hélice près de la coque avait considérablement augmenté les vibrations, presque nulles dans les premiers essais.

Les derniers essais, le 4 mars 1904, ont été exécutés avec des hélices de même pas : 760 millimètres, réduits à 760, 710 et

635 millimètres. On a obtenu une augmentation de 16 0/0 dans la vitesse des turbines, avec les mêmes pressions d'admission et les mêmes vitesses du navire, de sorte que l'augmentation du rendement des turbines était compensée par la diminution de celui des hélices, dont les glissements s'élevaient à 24,6 0/0 pour la turbine de haute pression et 33,1 0/0 pour celle de basse pression. Il semble difficile d'obtenir plus de cette disposition d'hélices à la suite sur un même arbre, défectueuse en ce sens que l'hélice d'avant agit sur de l'eau déjà actionnée par celle d'arrière. Mais, avec une seule hélice, pour ne pas dépasser un glissement de 25 0/0, il faudrait en augmenter le diamètre plus que ne le permet l'inclinaison des arbres du torpilleur *Yarrow*.

« En résumé, les turbines ont un rendement meilleur que les machines à pistons en pleine puissance et aux grandes vitesses des navires ; mais, pour en retirer tout le bénéfice, il faudrait que leurs arbres ne fussent pas inclinés, de manière à permettre d'employer des hélices uniques d'un diamètre suffisant. Cette horizontalité des arbres d'hélices entraine une modification correspondante de la coque, de sorte qu'une coque faite pour des machines à pistons ne convient plus pour les turbines. Aux faibles vitesses, les turbines cessent d'être économiques ; elles sont, en outre, désavantageuses pour la marche arrière et les manœuvres, mais on peut y remédier en associant aux turbines une machine à pistons indépendante et commandant une hélice auxiliaire. Une machine de ce type, d'une puissance égale à 40 0/0 de la puissance totale, permettrait d'augmenter de 15 à 20 0/0 la puissance que donnerait l'emploi d'une seule machine à piston, tout en conservant les avantages particuliers aux turbines. »

Turbine à vapeur Curtis. — Ce système a été breveté en 1895, mais ce n'est que depuis deux ans qu'il a reçu la sanction de la pratique. Il a fait l'objet de longues et coûteuses expériences de la part de la *General Electric* C^{o} avant d'avoir reçu sa forme et ses dimensions définitives.

On connait le principe sur lequel sont basées les turbines de Laval et de Parsons que nous avons longuement étudiées dans les chapitres précédents.

La turbine Curtis procède à la fois des principes de ces deux

turbines, tout en bénéficiant de dispositions nouvelles qui y donnent un caractère vraiment original.

Son arbre moteur est vertical, et la turbine est de ce fait fort peu encombrante. Le schéma (fig. 93) permet de comprendre rapidement les ingénieuses dispositions et le fonctionnement de l'appareil.

La vapeur commence par subir dans des ajutages directeurs une détente qui se transforme presque complètement en vitesse. Elle passe ensuite à travers deux ou trois couronnes mobiles alternant chacune avec une ou deux couronnes fixes, dont les aubes sont disposées en sens inverse des aubes mobiles. La vitesse de la vapeur n'est ainsi que partiellement absorbée par ces dernières qui, par suite, sont animées d'une vitesse relativement faible.

La détente de la vapeur et l'absorption consécutive de sa force vive forment dans cet appareil une phase complète, qui peut être répétée plusieurs fois.

La turbine Curtis comporte un nombre variable de phases entre les couronnes desquelles se trouve une cloison portant, venus de fonte, d'autres ajutages qui conduisent la vapeur d'une phase à la suivante en lui permettant de se détendre davantage. Chaque phase elle-même comprend un nombre variable de couronnes mobiles et fixes. La fixation du nombre de ces éléments dépend naturellement de la détente et de la vitesse de rotation à obtenir en même temps que des diverses conditions d'utilisation de la turbine.

D'une manière générale, pour obtenir une vitesse de rotation plus faible, il faut augmenter le nombre des phases, ou celui des couronnes fixes et mobiles dans chaque phase, ou tous les deux à la fois. Il est de bonne règle de graduer la détente de la vapeur de façon que chaque phase absorbe une même fraction de la puissance vive totale de la vapeur. Les pertes et les fuites d'une phase sont récupérées par la suivante ; les eaux de condensation se rendent aussi d'une phase à l'autre, sans être évaporées à nouveau et sans occasionner la perte corrélative. Les ajutages de la première phase règnent sur un sixième environ de la périphérie de la turbine, tandis que les autres s'étendent ordinairement sur toute la circonférence ; ils ont un jeu de 1 à $2^{mm},5$ avec la couronne voisine.

La régulation de la turbine s'effectue en obturant un nombre variable d'ajutages primaires ; à cet effet, ils sont pourvus de soupapes que vient soulever la vapeur elle-même, lorsqu'elle est

admise par les distributeurs mus électriquement sous l'action d'un régulateur à boules. Celui-ci est disposé à la partie supérieure de la turbo-dynamo ; par sa tige il agit sur un contrôleur magnétique et le fait exciter successivement un nombre plus ou moins grand d'électro-aimants qui agissent, à leur tour, sur les distributeurs placés au-dessous de la conduite de vapeur.

Dans les autres phases, le réglage corrélatif des ajutages, destiné théoriquement à améliorer le rendement aux faibles charges, procure, en réalité, une économie trop peu importante pour jus-

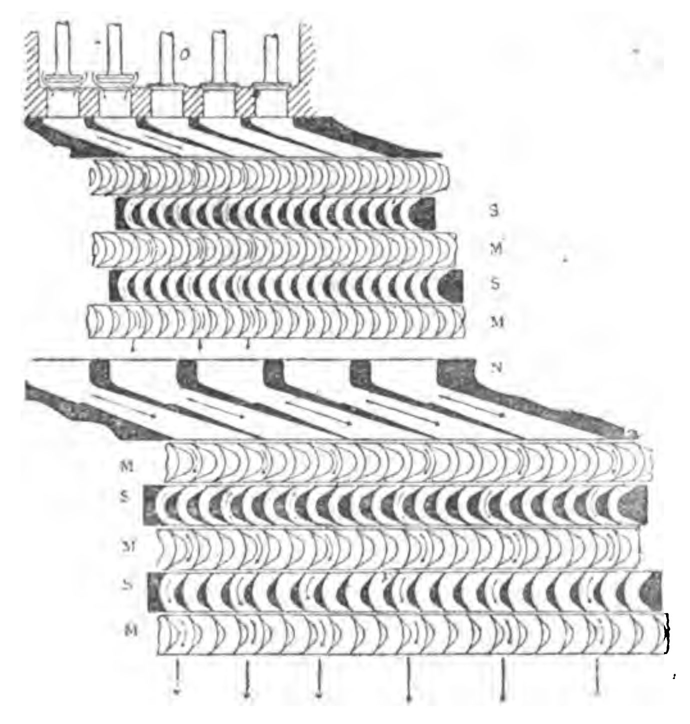


Fig. 93. — Turbine à vapeur de Curtis.

tifier la complication de mécanisme qu'il nécessite et ces ajutages restent toujours ouverts. Cependant, on peut y employer des soupapes automatiques qui ouvrent des ajutages supplémentaires quand la pression dépasse un certain maximum dans les chambres intermédiaires. Entre la pleine charge et la marche à vide, l'écart normal de vitesse ne doit pas excéder 2 0/0. Enfin, un régulateur

de sécurité ferme un papillon de la conduite de vapeur pour empêcher la vitesse de franchir la limite permise.

Les résultats véritablement encourageants obtenus avec une unité Curtis de 600 kilowatts, surtout au point de vue de la faible consommation de vapeur, permettent d'espérer des rendements encore meilleurs avec des machines plus puissantes. Une turbine de 5.000 kilowatts vient d'être construite; son élasticité de puissance est considérable. A la fréquence de 25, elle fait 500 tours à la minute et 514 à la fréquence de 60. On en voit les dimensions principales dans la figure 93.

Dans les petites machines, les aubes sont taillées mécaniquement dans des disques en acier, tandis que dans les grandes, elles sont faites en bronze et fixées mécaniquement. Dans une turbine de 500 kilowatts, les trois couronnes de la première phase, ont chacune 280 aubes de 19 millimètres de largeur, et celles de la seconde qui diffèrent en courbure et en profondeur des précédentes, en ont 185 seulement de 25 millimètres, soit 1.395 au total, pour des couronnes de 1m,37 de diamètre.

Les dimensions et le nombre des ajutages varient suivant la quantité de vapeur requise pour la marche à échappement libre, et comme, dans l'emploi de la condensation, la moitié de ces ajutages restent fermés, la turbine peut supporter une surcharge de 100 0/0.

Il n'est pas sans intérêt d'ajouter qu'une pompe mue automatiquement injecte de l'huile à la pression de 18 kilogrammes et plus dans la crapaudine de l'arbre de la turbine de façon à en équilibrer le poids.

La turbine Curtis est l'œuvre collective de plusieurs inventeurs tels que Bentley, Junggren, Garoway et Emmet, dont les brevets, analysés dans la *Revue de Mécanique* de janvier 1904, présentent des détails de construction du plus haut intérêt. Ce modèle a déjà pris une certaine extension aux Etats-Unis, il est également construit à Rugby, en Angleterre, par la *British Thomson-Houston Cie*, qui s'est unie avec plusieurs Compagnies, notamment la Riedler Stumpf, de Berlin, pour constituer une sorte de trust pour la construction en grand des turbines à vapeur.

Turbine Riedler Stumpf. — Puisque nous parlons de ce système récent de turbo-moteur, nous allons donner immédiate-

ment la description du type de 200 chevaux qui fonctionne à la station électrique de Moabit, près Berlin.

Les aubes réceptrices, dans la turbine Riedler-Stumpf, sont taillées dans le métal de la roue; les ajutages qui leur amènent la vapeur sont imbriqués les uns dans les autres ; leur section est carrée, forme qui paraît plus avantageuse que la section elliptique des ajutages de Laval. Ils forment un anneau continu autour de la roue et sont en acier au nickel. Ces aubes sont avec arête médiane, comme dans la roue hydraulique Pelton, imbriquées les unes sur les autres et fermées latéralement, de sorte que la vapeur y est guidée de l'entrée à la sortie. Le jeu entre la roue et les ajutages est de 3 millimètres radialement et de 10 millimètres suivant l'axe des ajutages, et il peut être porté sans inconvénient à 5 millimètres radialement.

Les aubes réceptrices peuvent être en U simple ou double. La turbine de Moabit marche à 53.000 tours ; la perte de la vitesse de la vapeur dans les ajutages est d'environ 5 0/0 ; il y a, en outre, deux pertes de 15 0/0 dans les aubes d'abord, puis dans l'échappement qui laisse la vapeur arriver au condenseur avec une grande vitesse; la dépense de vapeur est d'environ 8 kilogrammes par kilowatt-heure, avec une pression d'admission de 13 k. 25 et un vide de 85 0/0 au condenseur. La roue pèse 850 kilogrammes; l'équilibrage est parfait, le centre de gravité se trouvant à moins de $0^{mm},10$ de l'axe, ce qui dispense d'un arbre élastique.

Dans les types compound, où la vitesse de la vapeur est utilisée deux fois, sa marche est renversée par des directrices en passant d'une rangée de réceptrices à l'autre, sur une même roue ou sur deux roues.

La première de ces turbines, de 800 millimètres de diamètre, faisant 20 chevaux à 3.500 tours, dépensait 17 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

Il paraît inutile d'étager plus de deux roues traversées successivement par la vapeur, et l'on peut ainsi réduire la vitesse à 750 et 500 tours. Un type de ce genre est constitué par le groupement de deux turbines compound, à deux roues chacune, séparées par une cloison. Ces turbines sont fort simples, mais ne présentent aucun avantage, comme dépense de vapeur, sur les types de puissance équivalente.

Turbine à vapeur Westinghouse. — On vient d'essayer aux ateliers Westinghouse un groupe électrogène de 1.200 kilowatts, construit par cette Compagnie pour « l'Interborough Rapid Transit Company ». Ce groupe, dit notre confrère la *Revue Industrielle*, est constitué par une turbine directement couplée à un alternateur.

Les résultats et conditions d'essai communiqués sont les suivants d'après *L'Industrie Electrique* :

Pour une quantité d'énergie électrique équivalente à un cheval-heure, la consommation à pleine charge a été de 15 livres de vapeur, c'est-à-dire 6^{kg},8 soit 9^{kg},23 par kilowatt-heure. Le vide correspondant était de 68 centimètres de mercure, la pression atmosphérique étant de 76 centimètres.

L'essai, répété avec un vide de 71 centimètres, a donné 14 liv.,5 de vapeur, c'est-à dire 6^{kg},59 soit 8^{kg},95 par kilowatt-heure.

La vapeur était sèche et non surchauffée, et la pression à l'ajutage atteignait près de 11 kilogrammes.

L'essai de consommation a été suivi d'un essai de la soupape de sûreté, les turbines Westinghouse étant munies d'une pareille soupape, destinée à assurer l'arrêt automatique, au cas où un accident ferait cesser l'action du régulateur. L'appareil était réglé pour fonctionner après accélération de 10 0/0 au-dessus de la vitesse normale, et on a constaté au cours des essais qu'il fonctionnait régulièrement à 10 0/0.

On a fait aussi des essais de régulation, ou plus exactement de variation de vitesse par suite des variations de charge. Pour cela, on a plusieurs fois établi ou supprimé brusquement la pleine charge un certain nombre de fois, et constaté que les vitesses étaient peu influencées par ces variations brusques.

CHAPITRE XII

Les turbo-moteurs à gaz tonnants.

La conception d'une machine motrice fonctionnant, non plus par la force vive de la vapeur frappant avec une très grande vitesse les aubes d'une roue-disque fixée sur un arbre, mais par celle d'un gaz quelconque, n'est pas absolument nouvelle et on pourrait en trouver les premiers germes dans des brevets remontant à plus de quarante ans. Ce n'est toutefois qu'après que les turbines à vapeur ont eu fait victorieusement la preuve de leurs qualités, que l'idée de la turbine à gaz tonnants est revenue plus tenace et que des dispositions de moteurs rotatifs à gaz, dont certaines n'étaient pas sans ingéniosité, ont vu le jour.

Le moteur à gaz et surtout le moteur à pétrole (ou à essence) s'est considérablement répandu, en raison des avantages particuliers qu'il présente, et il est devenu un concurrent très redoutable de la machine à vapeur sur laquelle il a fréquemment pris le dessus. Il était donc tout indiqué, puisque la roue à aubes tendait à se substituer au piston, d'utiliser également cet organe pour le soumettre à la détente des gaz formant le mélange explosif dans les moteurs tonnants. Mais l'expérience n'a pas tardé à démontrer aux novateurs les difficultés insoupçonnées résidant dans cette simple substitution d'un fluide à un autre. Pour obtenir d'un volume de gaz donné un effet vraiment utile, il était nécessaire de le comprimer d'abord dans un espace resserré, de façon que la déflagration augmentât la détente et le rendement. Ces gaz chauds tendant à augmenter considérablement de volume, possèdent donc une force vive énorme qu'il est possible d'utiliser pour mouvoir à une excessive vitesse une roue-turbine analogue à la turbine Laval, mais leur emploi entraîne à des complications d'or-

ganes qui est telle qu'en définitive, on peut dire qu'à l'heure où paraît cet ouvrage, le problème est loin d'être résolu.

Nous allons donner, dans ce chapitre, la description des systèmes de turbo-moteurs à gaz tonnants inventés et brevetés dans le cours de ces dernières années. On se convaincra, par cette lecture, que la formule rationnelle du moteur à pétrole à rotation directe n'est pas encore établie, et qu'il faudra probablement encore plus d'un tâtonnement avant d'arriver au modèle définitif correspondant comme perfection aux turbo-moteurs à vapeur.

Moteur alterno-rotatif Auriol. — Au nombre des premiers types de moteurs rotatifs à pétrole qui aient vu le jour, on doit citer celui qui fut combiné par Gautier et Wehrlé aux débuts de l'automobilisme. La distribution s'y trouvait opérée à l'aide d'une simple palette, que le mélange gazeux appuyait contre la paroi intérieure d'une boîte cylindrique, et qui jouait ainsi le rôle de piston. Deux machines semblables étaient accouplées et fonctionnaient associées : l'une aspirant et refoulant le mélange, la compression une fois achevée, dans la seconde. Rien n'était moins compliqué, en vérité, mais on devine quel pouvait être le rendement et la rapidité d'usure de la palette et du cylindre dans un pareil système.

Le moteur Auriol, qui parut vers la même époque est tout différent ; sa caractéristique réside dans les moyens employés pour transformer le mouvement rectiligne alternatif des pistons en un mouvement circulaire continu, ainsi que dans le mode de distribution des gaz.

Le cylindre A (fig. 94), est relié par des brides à l'arbre moteur D, qui tourne dans les longues douilles E assujetties aux paliers de la machine, et sont par conséquent immobiles. Avec chacune de ces douilles sont fondus deux excentriques GG^1 et G^2G^3, dont les colliers sont attelés deux à deux avec les arbres oscillants GG′ qui portent les pistons BB′ ; les excentriques d'une paire ont le même calage et font un angle de 180° avec les excentriques de l'autre paire ; tous roulent dans leurs colliers sur des billes qui atténuent les frottements.

L'explosion se produit entre les pistons qui agissent sur les excentriques fixés dans une direction plus ou moins oblique par rapport à l'axe longitudinal du cylindre A, celui-ci prend aussitôt

un mouvement de rotation auquel participe l'arbre transversal D. Comme les pistons sont animés de mouvements réciproques, ils se trouvent toujours à une égale distance de cet arbre et dans des positions symétriques, de telle sorte que ce moteur est parfaitement équilibré.

La distribution s'opère autour des tourillons de gauche, dont le palier porte l'arrivée d'air carburé R et la sortie S des gaz brûlés. Sur la face dressée de ce palier tourne, autour d'un manchon E,

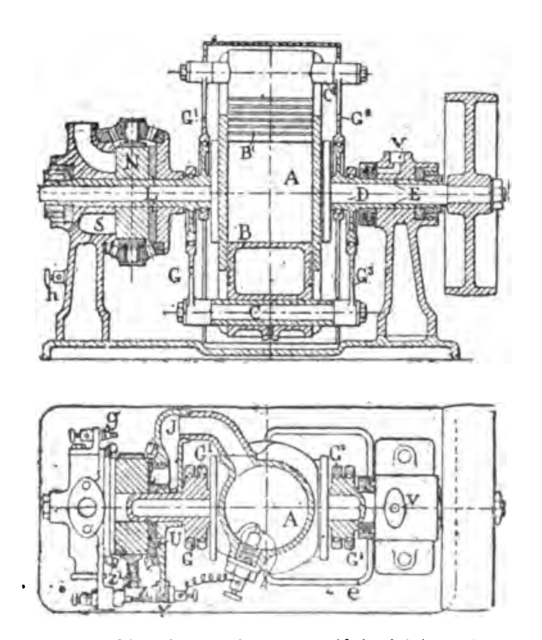
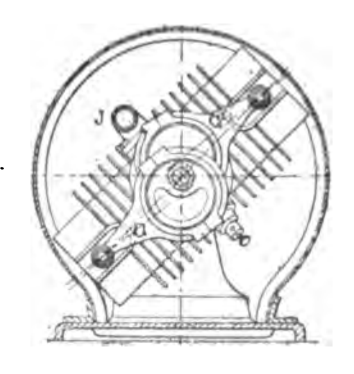


Fig. 94 et 95. — Moteur rotatif Auriol (coupe).

le distributeur N, lequel est percé de deux orifices OP disposés à 90° l'un par rapport à l'autre. Sur la droite de ce distributeur s'appuie, sous l'action de petits ressorts intérieurs, un disque V portant une tubulure L assemblée dans un plateau J fondu avec un tuyau aboutissant au milieu du cylindre. Le disque participe par conséquent au mouvement de rotation du cylindre. Une roue conique fixe est montée sur le palier de distribution ; une roue semblable faisant face à la précédente est calée sur le plateau JLU ; dans ces roues engrènent deux pignons fous tourillonnées verticalement sur le distributeur qui, sous l'action de cet engrenage dif-

férentiel, tourne moitié moins vite que le cylindre et le plateau JU.

Au début d'une course, les orifices O et P du distributeur N se trouvent entre l'ouverture L qui, en raison de la vitesse prépondérante de son plateau, passe devant O situé à ce moment en face de R ; l'air carburé est ainsi aspiré par la conduite J dans le cylindre.



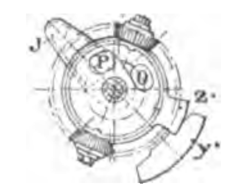


Fig. 96 et 97. — Moteur Auriol. Détail du mécanisme.

Lorsque L a fait une demi-révolution, O n'a avancé que d'un quart de tour et n'est plus découvert ; pendant une rotation de 180°, L tourne devant une partie pleine du distributeur N et la compression du mélange explosif s'effectue dans le cylindre ; survient ensuite l'inflammation électrique. L tourne pour la troisième fois à 180°, et à la fin de cette course, les orifices occupent les positions indiquées par la figure ; après quoi L découvre P qui est alors en face de la conduite d'échappement S ; il revient finalement à sa position primitive à la fin d'un quatrième parcours de 180°.

En V se trouve un graisseur dont l'huile s'écoule par gravité, au moment où coïncident des ouvertures ménagées dans deux plateaux accolés et se rend par les tuyaux *e* sur les parties à lubrifier.

L'allumage électrique est réalisé par le contact *y* établi sur un prolongement du plateau U et frottant au moment voulu sur un balai *z* relié à une bobine d'induction. Le circuit inducteur se ferme lorsque *z* vient en contact de la borne isolée *g* ; par *h*, se fait le retour des courants inducteurs et induits.

Moteur Arnaud et Marot. — MM. Arnaud et Marot ont combiné et exposé en 1900 un moteur du même genre que le type Auriol que nous venons de décrire et qui, sous le poids

très minime de 28 kilogrammes pouvait développer un travail de 150 kilogrammètres par seconde. La bielle, les manivelles et les soupapes se trouvent radicalement supprimées ; les masses en mouvement jouent le rôle de volant, enfin l'uniformité du mouvement est assurée. Mais les innovateurs n'ont pas fait connaître la consommation de leur machine pour un travail donné, ce qui eût été au moins nécessaire cependant; aussi sommes-nous bien obligés d'imiter leur prudente réserve et de passer à l'examen d'un autre type récemment breveté en France par M. Uhlenlüth.

Moteur Uhlenlüth. — Le principe sur lequel est basé ce système est celui de la réaction de deux explosions simultanées se produisant en opposition dans un mélange explosif comprimé dans des culasses de section elliptique, et sur celui de la détente des gaz provenant de ces explosions.

Le récepteur AA^1 (fig. 98) est constitué par deux disques juxtaposés tournant en sens contraire sur un manchon B fixé au bâti C. Sur la face latérale de chaque couronne sont creusées trois cavités DD′ D″, dont une sert de chambre d'explosion et les deux autres de chambres de détente. Lorsque les culasses d'explosion des deux couronnes coïncident, elles forment une chambre de section elliptique *d′ d′* représentée en pointillé (fig. 98). Le joint de deux couronnes coupe obliquement le plan de l'ellipse ; il en est de même pour les chambres de détente au moment de leur rencontre. Les deux couronnes sont venues de fonte avec un moyeu formant douille aa^1. Leurs faces latérales bien dressées sont rapprochées avec un jeu de quelques dixièmes, que l'on règle avec les écrous à billes E servant de butées, placés aux extrémités du moyeu. Pour rendre le joint étanche l'inventeur place dans une rainure F circulaire et concentrique un anneau G en métal ou amiante.

Pour bien assurer la coïncidence des culasses et leurs relations réciproques pendant la marche des couronnes qui doivent avoir la même vitesse en sens contraire, elles sont reliées par des engrenages droits H,H_1 qui engrènent avec des cercles dentés II placés sur les moyeux des couronnes AA^1. Sur les arbres JJ tournant en sens opposé, se fait la prise de mouvement au moyen d'une poulie ou d'une roue à friction. Dans le manchon B servant d'axe aux

deux couronnes est placé le vaporisateur K autour duquel circulent les gaz de l'échappement dans les canaux d'évacuation LL ; O est un manchon en toile métallique recevant le pétrole du vaporisateur P. La pompe Q à deux corps comprime de l'eau dans un récipient communiquant avec le réservoir de pétrole S par le tuyau recourbé T.

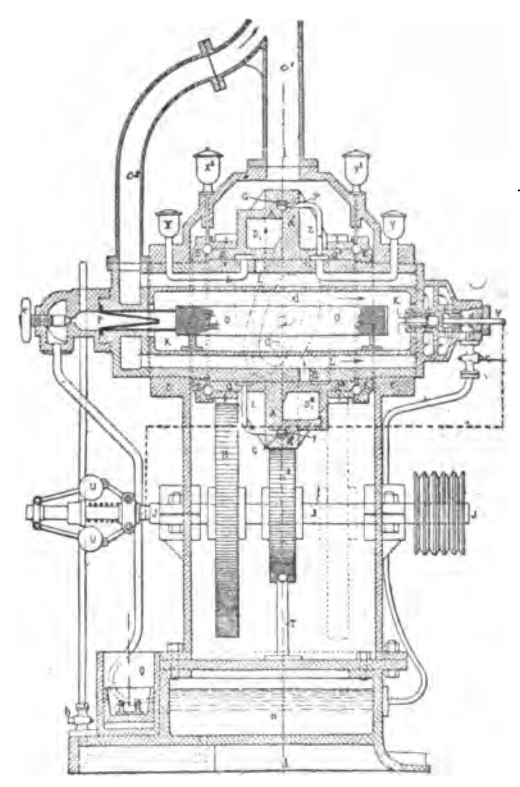


Fig. 98. — Moteur Uhlenlüth.

Une soupape à ressort décharge la pompe dès que la pression dépasse la tare du ressort. Le régulateur U placé au bout de l'arbre J actionne la tige V de la valve *j* réglant l'introduction du mélange tonnant dans les distributeurs.

Le graissage des différents organes est assuré par les graisseurs X[1] Y pour les engrenages et butées. Les couronnes A sont lubréfiées par un graisseur disposé dans le canal inférieur d'échappe-

ment, la force centrifuge tend à chasser l'huile vers l'extrémité des couronnes. Le refroidissement des parois a lieu au moyen de l'air déplacé par les ailettes Z.

Voyons maintenant le fonctionnement du moteur. On commence au moyen de la pompe de compression par comprimer de l'air; on introduit dans P une petite quantité de pétrole qui, pénétrant dans K, se gazéifie ; on allume les brûleurs et ouvre le robinet *c*, qui laisse pénétrer l'air dans le distributeur où il se mélange à une quantité de gaz du vaporisateur réglée par la valve *f* pour former le mélange explosif qui se rend dans les chambres de distribution. On fait alors tourner un des arbres J à l'aide d'une manivelle à cliquet, ce qui fait tourner ainsi les couronnes AA'.

Quand les culasses passent au-dessus des orifices *d* en tournant sur le manchon B elles se remplissent du mélange comprimé, puis en tournant elles arrivent à se rencontrer au-dessus d'un orifice d'allumage, d'où deux explosions simultanées chassent les couronnes en sens inverse. Les culasses rencontrent les chambres D, D', où les gaz brûlés se détendent et s'échappent par les canaux *i i* communiquant avec LL et s'évacuent dans l'air libre. Cette révolution accomplie, les culasses se remplissent à nouveau et ainsi de suite.

Quand le moteur est en marche, on ouvre le robinet *b* qui règle l'écoulement du pétrole en P, et l'on règle, à l'aide du pointeau *e* l'introduction de l'air dans le vaporisateur K.

On voit qu'il y a deux explosions par tour, mais on pourrait aussi n'en avoir qu'une et prolonger la détente.

Moteur rotatif Chaudun. — Ce système a été exposé en 1899 au Salon de l'Automobile aux Tuileries. Il était formé par la combinaison de trois éléments identiques, fonctionnant chacun distinctement et produisant l'action motrice par l'effet de l'explosion d'un mélange tonnant constitué à la manière ordinaire. Ce dispositif paraissait assez simple, les organes mobiles étant bien équilibrés, de façon que leur action motrice peut être combinée, réduite ou supprimée, suivant l'effort à développer. La mise en train s'effectuait en amenant les organes à la position correspondant à l'inflammation du mélange. Nos figures 99 à 101 permettront de saisir plus aisément les phases successives du mouvement.

Sur un bâti unique sont dressées deux boites de forme elliptique, égales en toutes dimensions A et A_1. Ces boites renferment deux cylindres BC et B_1 C_1, et deux arbres parallèles DE, sur lesquels sont montées des portions de disques constituant quatre pistons tournants, F et G, F_1 et G_1 et calés respectivement F et F_1 sur l'arbre D ; G et G_1 sur l'arbre D, les arbres E et D ayant leur mouvement conjugué par les engrenages K d'égal diamètre.

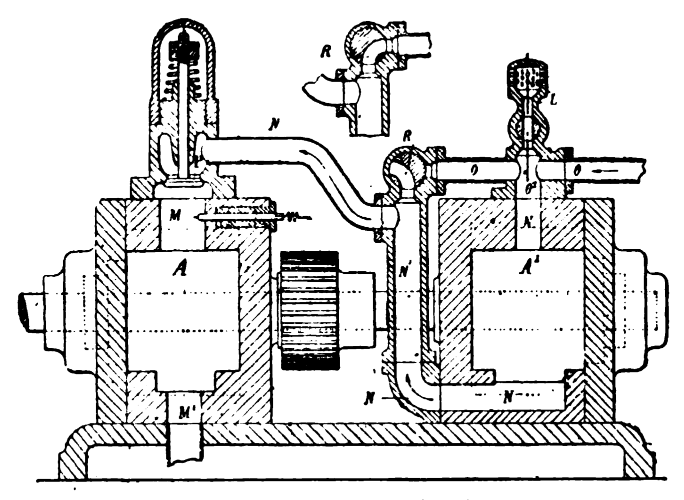


Fig. 99. — Moteur rotatif Chaudun.

Le groupe B_1 C_1 aspire par N l'air carburé et le comprime dans la chambre M où se produit l'explosion, puis l'effort moteur qui agit sur le groupe BC ; le piston F_1 comprime donc le mélange qui actionnera le piston F et le piston G_1 ; le gaz qui agira sur G,

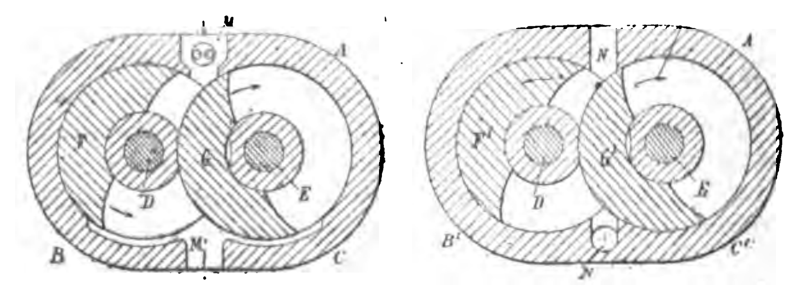


Fig. 100 et 101. — Disposition des palettes pendant le mouvement.

les mouvements étant rendus synchrones par les engrenages extérieurs K servant de liaison entre les deux arbres D et E.

L'air afflue à travers le tamis O_3 et le robinet O_1 ; le gaz arrive par O_1 ; il se mélange en N d'où il pénètre dans la boite A_1 ; puis est refoulé par le conduit N_3N_1 au-dessus de la soupape d'admission P, soupape automatique réglée par la tension du ressort P_1 ; comprimé en M le mélange gazeux s'allume par l'étincelle électrique produite par la bougie M_1, puis agit sur l'un ou l'autre piston de la boite A. L'échappement des gaz brûlés a lieu par M_4 au-dessous du bâti.

Sur la figure 99, le robinet N_6 est disposé pour la marche normale donnant la continuité de la poussée $N_1 N_2 N_3 N_4$; mais au démarrage, on tourne le robinet N_6 dans une position inverse, le moteur marche alors sans compression. En suivant le cycle sur les figures 99 et 100, on voit que le piston F, poussé par les gaz allumés en M, chasse par M_1A_2 les gaz de l'explosion précédente, tandis que G et G_1 jouent ensuite le rôle de moteur et compresseur, comme précédemment G. et F.

En somme, le groupe A et B est le moteur proprement dit, donnant une explosion par tour, grâce à la compression préalable réalisée par le groupe A_1 B_1, tous les mouvements étant conjugués.

Il reste à savoir ce que ce dispositif, qui rappelle celui des rotatives à vapeur et des pompes Behrens, donnerait dans la pratique, avec l'air carburé. Nous aurions désiré, pour nous former une opinion, voir fonctionner ce système et connaître les résultats, mais le constructeur s'est borné à nous affirmer que la consommation d'essence était sensiblement égale à celle qui a été relevée pour des moteurs à pistons de même puissance que le modèle exposé, et nous sommes bien obligés de nous borner à cette indication plutôt vague et au sujet de laquelle nous faisons nos réserves. Il est probable d'ailleurs que des défauts insurmontables se sont révélés par la suite car on n'a plus entendu parler de cette rotative à pétrole depuis sa courte apparition.

Moteur rotatif André Betz. — Ce système fonctionne par **l'explosion d'un mélange détonant, à raison de deux explosions par tour, avec compression préalable.**

Ce n'est pas une simple turbine à gaz tonnant fonctionnant par la force vive d'un courant, la puissance expansive de l'explosion est, en réalité, utilisée. Notre figure 102 montre ce système vu en élévation et la figure 103 en plan. La boite fixe dans

laquelle se produit la rotation d'une pièce calée sur l'arbre, est représentée en R. C'est un tore creux jouant le rôle de cylindre. Dans ce tore tourne un disque qui forme avec lui un espace annulaire où s'opère le travail des gaz. Il porte deux surfaces tronconiques suivant le profil intérieur du tore et une face courbe médiane opposée à celle du tore.

La face médiane est en contact avec deux tiroirs obturateurs qui ne se retirent que pour le passage de deux dentures faisant corps avec le disque intérieur aux extrémités d'un même diamètre elles ferment la section annulaire et font office de pistons.

Sur l'un des côtés du tiroir se trouve l'admission du gaz au moyen du distributeur A, et de l'autre côté la soupape de refoulement B de l'air comprimé venant d'un réservoir W.

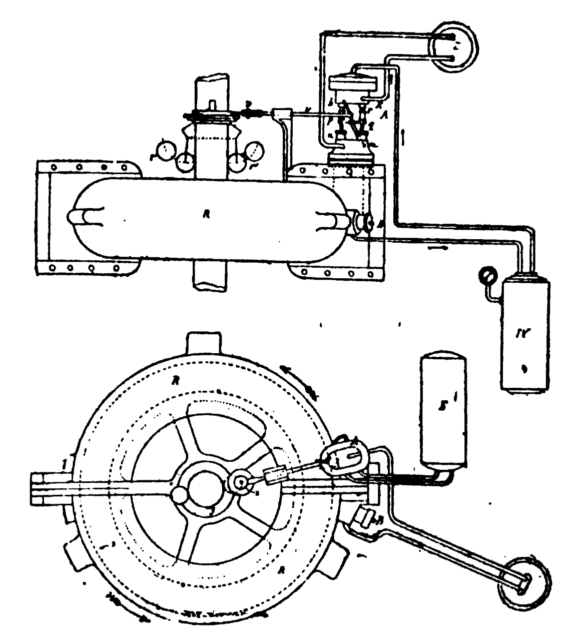


Fig. 102 et 103. — Moteur rotatif Betz.

L'admission des gaz se fait par le distributeur A qui se compose de deux boites, dont la supérieure est renversée et superposée à la deuxième. Elles communiquent par le dessus avec le réservoir d'air comprimé.

Les chapelles *r* et *m* communiquent ensemble. Les chapelles *k* et *m* communiquent la première avec l'arrivée au carburateur **E**,

la deuxième avec le retour. Un mouvement de sonnette p, q, r, agit sur les tiges des soupapes en l,m,n,k. Lorsque les soupapes k et n sont ouvertes, l'admission de l'air carburé se produit ; au contraire l'air carburé pénètre seul lorsque ce sont les soupapes l et m qui sont ouvertes. Lorsque les cames y échappent au galet z, il n'y a plus aucune admission. L'allumage se fait électriquement.

Turbine Warmont. — Cette turbine à axe horizontal, comme la turbine de Laval, peut être classée dans les appareils de ce genre comme étant du système mixte, c'est-à-dire mi-centrifuge et mi-centripète, puisque le fluide agit tangentiellement à la circonférence moyenne des aubes.

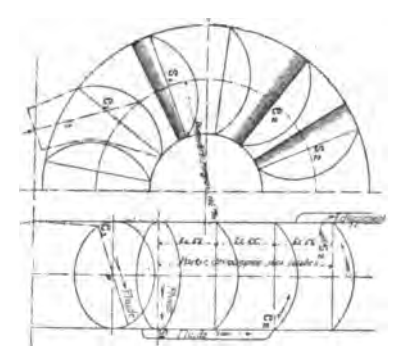


Fig. 104. — Turbo-moteur Warmont.

Ce fluide composé de vapeur ou d'un mélange de vapeur ou d'air chaud, ou simplement d'air chaud, arrive sur le côté des aubes en e^1 (voir le tracé, fig. 104), mais normalement à ces aubes qu'il traverse diamétralement dans leur partie concave pour ressortir en S^1, suivant un canal d'échappement pratiqué dans la flasque opposée à l'arrivée. Puis, la vitesse de ce fluide étant double de celle de la turbine, ce fluide rattrape l'aube précédant la première atteinte en e^2, exerce sa pression sur cette deuxième aube en suivant diamétralement son profil approprié aux deux vitesses du fluide et de la turbine pour ressortir en S^2 dans un nouveau canal d'échappement pratiqué dans l'épaisseur de la première flasque d'arrivée du fluide. La turbine motrice, dans son ensemble, se compose de deux flasques portant les coussinets de l'arbre de la turbine proprement dite et assemblées par des boulons dans le plan diamétral des aubes. L'étanchéité du joint de

ces deux flasques est assurée par un cordon d'amiante dont le serrage se fait par les boulons d'assemblage.

L'une des flasques porte la tubulure ou bossage d'assemblage de la conduite du fluide et contient, en outre, deux canaux d'échappement vers le bas et le haut de la turbine, l'autre flasque ne porte qu'un canal d'échappement vers le milieu; on se rend compte facilement par le tracé de cette turbine que l'échappement du fluide agissant sur les aubes peut se faire à la moitié, aux trois quarts de la circonférence, comme ce fluide peut agir sur toutes les aubes, moins une, en utilisant ainsi une très grande détente. Il suffira simplement de donner aux canaux d'échappement une section convenable.

Terminons en disant que le turbo-moteur Warmont figura à l'Exposition de 1900 à l'annexe de Vincennes, mais il ne fut pas donné au public de le voir fonctionner, si bien qu'on est encore réduit aux suppositions et aux conjectures sur la réelle valeur de ce dispositif dont on n'a d'ailleurs plus entendu parler depuis cette époque.

Volant-moteur « Seja ». — C'est un moteur rotatif de création toute récente, puisqu'il a figuré pour la première fois au

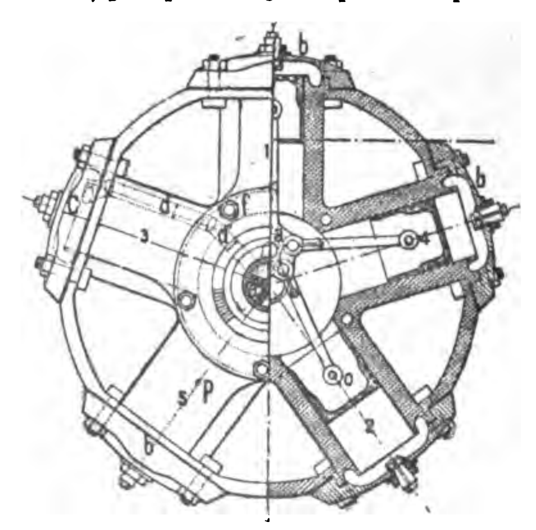


Fig. 105. — Volant moteur Sejà

Salon de l'Automobile de 1903. Il est surtout remarquable par sa légèreté spécifique, un modèle de 15 chevaux effectifs ne pesant

pas 30 kilogrammes. C'est donc le moteur idéal pour toutes les applications où le poids est le point essentiel, comme en matière de locomotion aérienne par exemple.

Comme nos deux figures 105 et 106 permettent de s'en rendre compte ce dispositif est assez ingénieusement combiné. Les soupapes, clapets, cames d'allumage, volants, etc., des moteurs à explosion ordinaires sont radicalement supprimés; il n'y a qu'une seule distribution pour les cinq cylindres. La régularité de fonctionnement est, paraît-il, remarquable par suite du synchronisme des phases évitant tout point mort.

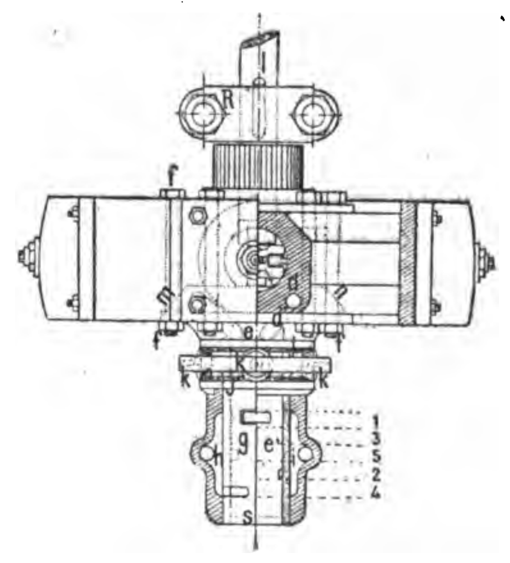


Fig. 106. — Plan du volant-moteur Sejà.

Le graissage est automatique et proportionné à la vitesse de rotation; le changement de marche s'opère par simple inversion, et le refroidissement est direct par radiateur sans eau. Enfin l'encombrement est réduit au minimum et l'appareil peut être placé horizontalement ou verticalement sans que sa marche soit troublée.

Voilà de bien belles promesses; espérons que l'expérience prolongée ne les démentira pas et que le « volant-moteur Seja » obtiendra le succès qu'il brigue.

Moteur alterno-rotatif Primat, à gaz tonnants. — De même que les moteurs à explosion, les moteurs rotatifs, malgré l'attrait des uns et des autres, présentent de nombreux inconvénients. Tous les essais tentés, toutes les inventions nouvelles de ce genre n'ont pas donné les résultats qu'on en attendait; des modifications y ont été apportées, et ces multiples transformations et perfectionnements n'ont pas abouti pour la plupart.

Aussi sommes-nous heureux de pouvoir décrire ici un type de moteur rotatif à explosion qui semble avoir atteint le but poursuivi depuis si longtemps par tous les inventeurs. Ce moteur n'a pas dit son dernier mot, et nous sommes à peu près persuadés que l'avenir montrera le bien fondé de nos prévisions. Ce moteur représenté la coquille enlevée est un moteur à quatre cylindres dans lesquels se déplacent quatre pistons. Les cylindres et les pistons ont la forme d'un tore de révolution. Vu son faible encombrement et sa forme circulaire, il peut servir de moteur de traction pour automobiles, locomotives, tramways, bateaux, etc. Cet emplacement réduit assure sa facilité de fixation sur le châssis de voiture, sur les ponts ou planchers des navires.

Est-il moteur à poste fixe, il est dépourvu de ces encombrants et lourds bâtis qui sont indispensables aux moteurs ordinaires.

Employé comme moteur à explosion, il est à quatre temps; les quatre pistons fonctionnent chacun suivant le cycle complet des moteurs de cette catégorie.

Deux pistons diamétralement opposés sont réunis, soit au moyen de bielles, soit par l'intermédiaire d'une pièce unique qui régularise leur mouvement.

Ces bielles ou ces pièces servant de liaisons agissent sur un balancier qui prend alors un mouvement alternatif. Ce mouvement est transmis à une roue d'engrenage qui est mise en mouvement par une petite biellette articulée sur le balancier; elle transmet le mouvement à la roue principale clavetée sur l'axe de rotation du moteur.

Ce mouvement de rotation, transformation du mouvement d'oscillation du balancier, peut être obtenu de diverses façons, par excentrique, plateau-manivelle, etc.. au gré du constructeur. Les pistons étant couplés deux à deux ainsi qu'on l'a vu, l'aspiration, la compression, l'explosion et l'évacuation sont assurées alternativement comme dans les moteurs à quatre cylindres.

Description du mécanisme. — Si nous enlevons une des coquilles du moteur, l'autre nous apparaît comme un tore divisé en deux parties par une cloison diamétrale; dans chaque demi-tore se trouvent les deux pistons *d* 1, 2, 3, 4. *e* et *e* sont les pièces articulées qui les réunissent.

Nous remarquons aussi le bras diamétral oscillant *h* et une bielle double articulée sur ce bras et qui transmet ce mouvement d'oscillation à la petite roue d'engrenage qui, avec son axe *i*,

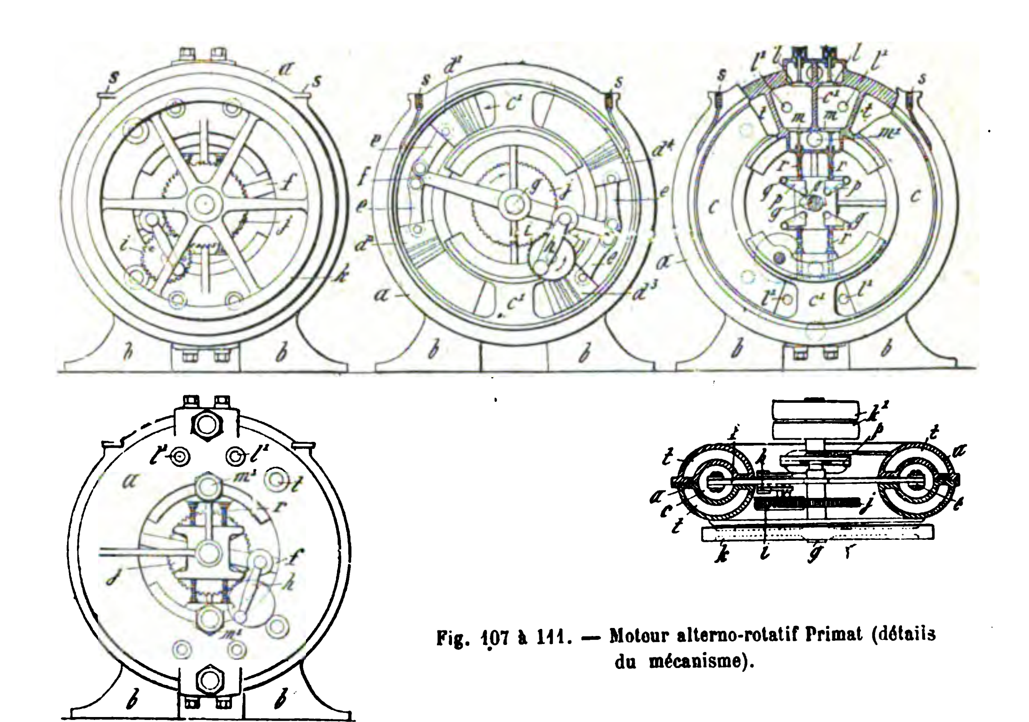


Fig. 107 à 111. — Moteur alterno-rotatif Primat (détails du mécanisme).

arbre-manivelle prend alors un mouvement continu de rotation ainsi que la roue axiale *j* engrenant avec elle, et est solidaire de l'arbre *g*, sur lequel est fixé le volant *k*.

La figure 110 nous représente le moteur le couvercle ôté; on aperçoit l'intérieur des cylindres avec leurs orifices d'aspiration l^1 et l^1 et d'échappement *m* et *m*; les bougies d'allumage en *l* et les chambres de compression en *t*.

La came O, qui est fixée à l'axe de rotation g, commande les 4 soupapes au moyen des pièces p.

t est la chambre d'eau ; k le volant et k^1 la poulie de transmission; y, y, les admissions; t les entrées d'eau; t^1 les sorties; $m^1 m^1$ les échappements; l^1 l^1, les bougies; s, s, les lumières pour le graissage. Sous un même diamètre, il est facile de donner à ce moteur des puissances différentes en augmentant soit l'alésage des cylindres, soit la course des pistons, soit les deux à la fois.

Ce moteur, tel qu'il est conçu, pourra être utilisé :

Comme moteur à explosion (pétrole, gaz, etc.) ;

— à vapeur ou à air comprimé;

Et pour les fluides comprimés (eau, huile, etc.) ;

Nous allons en examiner les différentes applications :

1° *Moteur à explosion.* — Un moteur à 4 cylindres de 70 × 160, essayé le 5 février 1903, a donné ce résultat : 950 tours, 14 chevaux.

A cette époque, le moteur n'avait pas subi les perfectionnements apportés depuis. Avec le type actuel, il peut facilement donner 20 chevaux dans les mêmes conditions. Ainsi employé, ce moteur pourra s'appliquer à l'automobilisme, en présentant cet avantage de simplifier beaucoup la construction des changements de vitesse, l'arbre ne tournant qu'à la demi-vitesse des oscillations des pistons ; de plus, suppression de l'arbre intermédiaire, puisque l'arbre de distribution est l'arbre du moteur lui-même.

Les mêmes avantages se retrouveront dans son application aux canots à pétrole, aux machines-outils, où il agira comme moteur d'atelier sans réduction exagérée de vitesse ; de même pour les groupes électrogènes, etc.

Nous voyons, d'après ce qui précède, que pour obtenir une même course, nous n'aurons que la projection d'un arc de cercle, soit en longueur, soit en hauteur, avec suppression complète de bielles longues; la transmission de l'effort résultant de la pression dans le cylindre se faisant sur l'axe de rotation.

Les masses en mouvement sont parfaitement équilibrées, et la réaction d'inertie du moteur considérablement réduite. C'est ainsi que l'irrégularité de transmission de l'effort relatif au moteur rectiligne est bien amoindrie, puisque l'on peut facilement empêcher la coïncidence du point mort de l'origine qui transmet le

mouvement à l'axe définitif avec les points morts avant ou arrière des pistons.

Par une multiplication ou une démultiplication de l'effort transmis sur l'arbre par les pistons l'on pourra obtenir une vitesse relativement faible, réduite directement par simple transmission.

Signalons encore la facilité avec laquelle la circulation d'eau de refroidissement peut s'effectuer, ainsi que sa légèreté et de sa simplicité jointes à une grande robustesse et qui font de ce moteur un modèle intéressant et présentant une réelle supériorité.

Employé comme moteur à vapeur, ce système est à longue détente. Une distribution par tiroirs Corliss ou soupapes Sulzer lui assureraient une marche très régulière.

D'après divers calculs relatifs à l'établissement de la machinerie d'un navire de moyen tonnage, l'encombrement d'un moteur Primat ne serait que de 1/15 de celui d'une machine à mouvement alternatif de puissance égale. Dans ce cas, la force développée devait être de 4.500 chevaux. On gagne donc comme place, pour un moteur de 6.000 chevaux 137 mètres cubes, et pour un de 10.000 chevaux 267 mètres cubes sur l'emplacement occupé par les machines à pistons en service actuel. Quant au poids, l'excédent de la machine ordinaire sur le système Primat serait de 7.200 kilogrammes, ce qui n'est pas négligeable.

Quelques chiffres permettront de mieux comprendre encore les résultats de ces essais :

MOTEUR ROTATIF ALTERNATIF, DIAMÈTRE EXTÉRIEUR, 0m,70 0m,75 POUR LA VAPEUR

Nombre de tours	Pression de la vapeur	Puissance en chevaux	Dimensions
—	—	—	—
600	6 kil.	16	
1.000	— —	25	Piston
600	8 —	20	0m,07 diamètre.
1.000	— —	36	
600	10 —	39	Course
1.000	— —	45	0m,16.
600	12 —	52	
1.000	— —	80	
600	6 kil.	94	
1.000	— —	152	Piston
600	8 —	145	0m,14 diamètre.
1.000	— —	240	
600	10 —	176	Course
1.000	— —	285	0m,20
600	12 —	263	
1.000	— —	360	

On peut donc pousser jusqu'à des puissances invraisemblables en augmentant la vitesse de rotation et la pression de la vapeur dans le moteur, et il est certain que si des défauts encore inaperçus ne viennent pas à se faire jour dans la pratique journalière et infirmer ces qualités, ce dispositif présente un grand avenir et un champ d'action presque illimité.

Machine rotative Münch. — M. Münch est un adroit mécanicien, doublé d'un inventeur au cerveau fécond, capable de trouver immédiatement la solution pratique de tous les petits problèmes de mécanique qui lui sont soumis chaque jour dans sa profession.

Comme tant d'autres chercheurs, ce praticien devait être séduit par la difficulté de la question à résoudre, ainsi que par l'importance des résultats qui seraient obtenus avec une machine à rotation directe. Il a donc étudié et réalisé un type de moteur de ce genre, dont nous avons été à même de voir le modèle, et il semble à première vue que, grâce aux procédés employés par M. Münch, la fameuse étanchéité du piston tournant, ainsi que la distribution et l'échappement, sont obtenus avec le maximum de simplicité d'organes et le minimum de poids. Il ne resterait qu'à déterminer exactement, par des essais d'une précision rigoureuse, la dépense d'un semblable moteur et le rendement en travail extérieur des calories dépensées.

Nous espérons que l'inventeur, en homme persévérant qu'il est, saura mener à bien l'achèvement de son type rotatif et fournir la démonstration mathématique de la valeur de sa conception, et nous lui souhaitons de réussir, dans l'intérêt général du progrès et de l'industrie des moteurs légers.

Moteur rotatif Golay. — M. Golay a étudié avec persévérance la réalisation du moteur rotatif à gaz tonnant. Après de longues recherches, qui l'ont conduit à modifier ses conceptions primitives, il s'est arrêté à la disposition suivante :

La machine est composée de deux pièces essentielles : un cylindre fixe en acier trempé, taillé dans la masse, et un organe mobile, appelé tambour ou *noix* et sur lequel s'exerce la pression des gaz après leur inflammation.

La forme de cette noix, qui est clavetée excentriquement sur

l'arbre de couche, est celle d'un cylindre, portant sur toute sa largeur quatre encoches servant de logement à des ailettes, pouvant coulisser dans ces encoches de façon à ce que leur bord externe frotte constamment sur toute la périphérie interne du cylindre-enveloppe. De petits ressorts à boudin logés au fond de ces entailles assurent par leur pression le contact parfait des ailettes avec le cylindre pendant toute la durée de la course.

Le fonctionnement s'opère comme suit :

Le mélange d'air et de vapeurs d'essence légère aspiré à travers le carburateur par le mouvement de chaque ailette se trouve comprimé pendant un partie de la course de cette ailette, l'espace occupé par les gaz aspirés diminuant dans une forte proportion en raison du mouvement excentrique décrit par le moyeu porte-palettes. La compression achevée, le mélange est enflammé par une étincelle électrique, produite à l'instant voulu par les procédés ordinairement employés dans les moteurs d'automobile. Les gaz instantanément dégagés par cette déflagration se dilatent et chassent l'ailette en avant. A un point calculé de la course, l'orifice d'échappement s'ouvre et les gaz brûlés sont expulsés au dehors, et le mouvement se continue par la répétition des mêmes effets.

Le cycle s'exécute donc en trois phases pour chaque ailette : 1° aspiration ; 2° compression, 3° inflammation, détente et échappement, et tous les deux tours complets, les choses se retrouvent dans l'état du début. Le moteur comporte trois soupapes commandées par équerres et engrenages réducteurs.

Le moteur rotatif Golay n'a pas évité, comme on en peut juger, les défauts que l'on reproche à juste titre à tous les moteurs du même genre : le frottement continu des palettes sur leurs trois faces, contre le cylindre de ses joues latérales est une cause d'usure rapide détruisant en peu de temps l'étanchéité obtenue à grand peine à moins d'un serrage amenant une perte de force très sensible par l'intensité du frottement. D'ailleurs la disposition même de la noix est loin d'être nouvelle ; on la trouve employée dans les pompes rotatives et certains systèmes de graisseurs. Aussi, ce moteur, comme tous ceux qui l'ont précédé et comme tous ceux qui le suivront et seront basés sur les mêmes idées erronées est-il frappé de stérilité native, et s'il était construit il ne donnerait évidemment qu'un rendement inférieur.

Tel est, à l'époque où nous écrivons l'état de la question de

moteurs à pétrole à mouvement rotatif direct ; on peut se convaincre qu'elle est encore bien loin d'être résolue. Mais il ne faut pas affirmer pour cela qu'un jour ne luira pas où le turbo-moteur à gaz tonnant se trouvera réalisé par un inventeur plus avisé ou plus ingénieux que ses prédécesseurs. On ne peut assigner de limite à la marche irrésistible du progrès, surtout en matière de mécanique appliquée et ce qui est chimère aujourd'hui peut demain être devenu vulgaire. Et nous souhaitons pouvoir donner dans une réédition augmentée de cet ouvrage, — si réédition il y a lieu un jour, — la description concrète et documentée du moteur rotatif encore dans les limbes, et qui supplantera victorieusement dès son apparition les modèles actuels à mouvement rectiligne alternatif dont nous sommes si fiers et qui rendent tant de services à l'industrie.

CHAPITRE XIII

Turbo-machines diverses

On peut ranger dans la catégorie des turbo-machines, certains appareils tels que les ventilateurs et les pompes centrifuges, dont l'organe principal est une roue à aubes. Pour compléter notre ouvrage, nous consacrerons donc quelques pages à l'étude rapide de ces appareils.

Pompes centrifuges. — Il existe plusieurs modèles de ces pompes. Les types les plus intéressants sont ceux qui ont été étudiés par Dumont, par Neut et par M. Schabaver. Elles se composent de deux parties principales : la roue tournante et l'enveloppe. Le nombre des aubes ou palettes dont est munie la roue varie de 6 à 12, la courbe qu'elles présentent fait, avec la tangente à la circonférence extérieure de la roue un angle de 23 degrés et avec la tangente au cercle intérieur un angle de 46°. La forme de ces aubes est exactement celle de développantes du cercle intérieur.

L'enveloppe extérieure, ou corps de la pompe, est construit le plus souvent en deux parties, en fonte moulée, accolées sur leur circonférence et reliées l'une à l'autre par des boulons. Des conduits intérieurs amènent l'eau autour des douilles des paliers pour combattre leur échauffement en marche et éviter les rentrées d'air. Un petit canal permet le dégagement des bulles d'air entraînées accidentellement et qui viendraient sans cela s'accumuler dans la partie supérieure de la pompe. Le diamètre du tuyau de refoulement est moindre que celui de l'aspiration, à cause de la grande vitesse dont l'eau est animée à sa sortie. On le raccorde au moyen d'un cône très allongé avec le reste de la conduite, qui a le même diamètre que l'aspiration.

Les pompes centrifuges sont d'un emploi avantageux pour élever de grands volumes d'eau (minimum 100 litres par minute) ; entre autres applications on peut s'en servir pour le dragage des vases molles et le transport des déblais avec quelques modifications de construction. Dans ce transport, la proportion de matières solides peut atteindre jusqu'à 15 et même 20 p. 100. L'effet utile

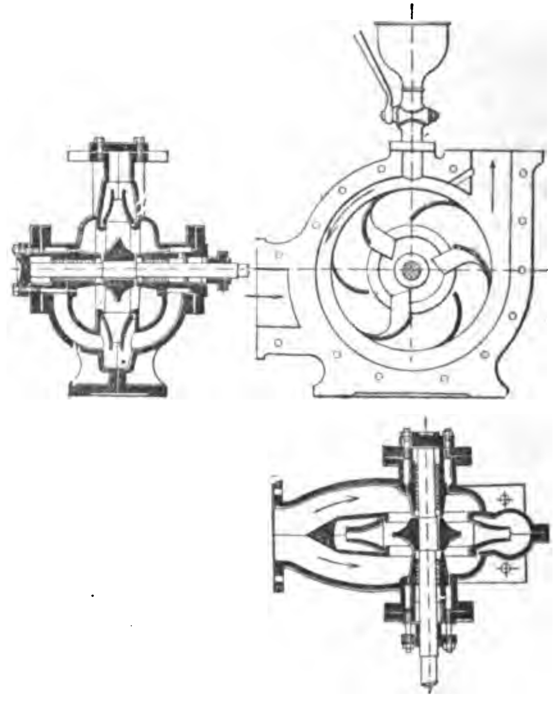


Fig. 112, 113 et 114. — Pompes centrifuges Dumont (coupes et plan).

peut être évalué à 60 p. 100, à la condition cependant que la hauteur d'aspiration soit inférieure à 4 mètres, et que la hauteur d'ascension ou de refoulement ne dépasse pas 15 mètres, car pour des hauteurs plus considérables, l'effet utile se trouve notablement diminué.

La vitesse angulaire la plus avantageuse est donnée par la formule suivante :

$$3/2 \sqrt{2 g H}$$

H étant la hauteur totale de refoulement en mètres, et g représentant le coefficient de l'accélération soit $9^{m},81$.

Il est d'usage de munir les pompes centrifuges d'un entonnoir avec robinet de manière à pouvoir les remplir d'eau et les amorcer au moment de la mise en marche. La dépense de travail, en chevaux est donnée par la formule :

$$N = a \frac{QH}{75 \times 60} - 1.000 ; \; a = 1/4 \text{ à } 2$$

La vitesse de l'eau dans les tuyaux ne doit pas dépasser 1 mètre par seconde pour les petits diamètres, 2 ou 3 mètres pour les plus grands. Le diamètre extérieur de la roue à palettes ou turbine est environ le triple du diamètre du tuyau d'aspiration. La largeur intérieure de la turbine est environ le tiers de ce même diamètre, et sa largeur extérieure et de 1/2 à 1/3 de la largeur intérieure. Ces proportions sont celles que l'on retrouve dans les pompes centrifuges Dumont de toutes grandeurs.

M. Schabaver a fait connaître un modèle de centrifuge basé sur des principes tous différents et qui paraissent scientifiquement exacts. Le rendement se trouve notablement accru, en même temps que la construction de l'engin est simplifiée.

Les pompes centrifuges sont ordinairement entraînées par une transmission à courroie, mais on les commande aussi directement, par un accouplement élastique ou rigide, à un moteur à grande vitesse. Le turbo-moteur à vapeur paraît tout indiqué pour cette application, aussi avons-nous vu qu'il existe des groupes de turbines-pompes système de Laval, donnant sous le minimum de poids et de volume, un rendement utile très considérable. La Société du turbo-moteur Parsons a également fait connaître un modèle de pompe à incendie formé d'une turbine accouplée à une pompe centrifuge.

Le moteur électrique à courant continu ou à courants alternatifs triphasés a été également préconisé pour la commande directe de ces pompes. La Société Gramme, la Société Générale Electrique de Nancy, les ateliers du Creusot, etc., ont ainsi fourni des moteurs associés à des pompes Dumont ou autres. Enfin le moteur à pétrole à grande vitesse (genre de Dion-Bouton) a été mis à profit dans certaines circonstances particulières et il a donné de bons résultats, travaillant à accouplement direct.

Lorsque la hauteur de refoulement de l'eau dépasse 15 mètres, il est d'usage de conjuguer plusieurs pompes montées sur un socle

unique la pompe n° 1 refoulant dans l'orifice d'aspiration de la pompe n° 2, celle-ci refoulant à son tour dans la pompe n° 3 et ainsi de suite. On peut ainsi arriver à élever l'eau à 60 ou 80 mètres de hauteur. Enfin, en associant les pompes en quantité on peut

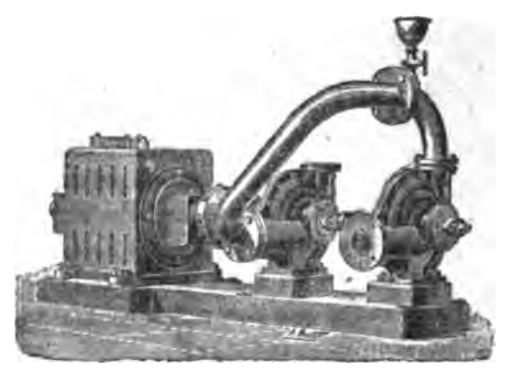


Fig. 115. — Pompe centrifuge commandée par un moteur électrique.

augmenter leur débit sans influer sur la hauteur d'ascension, toutefois cette disposition est moins usitée et on préfère employer une pompe unique de plus grandes dimensions.

Turbines-Pompes, à vapeur, système de Laval. — La turbine à vapeur de Laval peut remplacer les moteurs à vapeur de toute catégorie dans leurs diverses applications. Nous avons vu, dans le chapitre VIII, qu'elle peut commander par courroies des transmissions mécaniques à la manière ordinaire, et qu'on l'a associée aux dynamos à courant continu ou alternatif de façon à constituer un groupe électrogène compact et présentant, sous un volume restreint, une puissance très considérable. Mais ce ne sont pas les seuls emplois qu'elle a reçus ; on l'a également accouplée à des appareils exigeant une très grande vitesse de rotation, tels que des ventilateurs et des pompes centrifuges.

Turbines-pompes. — La turbine-pompe se compose d'une pompe centrifuge actionnée directement par la turbine à vapeur. Grâce à l'allure rapide nécessitée pour la marche normale de ces pompes, on a pu diminuer beaucoup le diamètre de la turbine les conduisant, et réduire, par suite, les résistances passives. Le rendement se trouve sensiblement amélioré et peut dépasser 70 p. 100, comme l'ont montré les expériences.

Etant donné la commande directe de la pompe par la turbine,

l'ensemble ainsi constitué fournit de très réels avantages. Le mouvement du mécanisme étant rotatif et continu, l'écoulement de l'eau se fait sans choc, de sorte qu'on n'a besoin ni de soupapes automatiques ni de réservoirs d'air, d'où une plus grande simplicité et un entretien moins coûteux et plus aisé.

Voici quelques tableaux résumant les données d'établissement de ce genre d'appareils, avec les résultats obtenus.

I. — *Turbines-pompes simples.*

Type de la turbine employée	Débit en litres par minute	Hauteur d'élévation en mètres	Poids approximatif en kilos	Diamètre de conduite d'aspiration et des brides	Diamètre de conduite de refoulement et des brides	Encombrement en millimètres		
						Longueur	Largeur	Hauteur
chevaux 3	750	12	160	100/230	100/230	930	415	470
5	1.300	11	270	125/260	125/260	1.245	455	765
10	1.400 2.000	20 15	470	125/260	125/260	1 375 1.395	600 615	900 900
15	2.200 3.750	20 12	500 550	150/290	150/290	1.530 1.635	615 645	900 900

II. — *Turbines-pompes conjuguées en parallèle.*

Type de la turbine employée	Débit en litres par minute	Hauteur d'élévation en mètres	Poids approximatif en kilos	Diamètre de conduite d'aspiration et des brides	Diamètre de conduite de refoulement et des brides	Encombrement en millimètres		
						Longueur	Largeur	Hauteur
chevaux 20	4.000	15	1.000	150/290	150/290	2.185	800	990
30	7.500	12	1.200	200/350	200/350	2.475	1.050	1.000
50	12.600	13	2.200	280/425	280/425	1.850	1.270	1.205
50	15.800	10	2 200	280/425	280/225	2.850	1.270	1.205

III. — *Turbines-pompes conjuguées en série.*

Type de la turbine employée	Débit en litres par minute	Hauteur d'élévation en mètres	Poids approximatif en kilos	Diamètre de conduite d'aspiration et des brides	Diamètre de conduite de refoulement et des brides	Encombrement en millimètres		
						Longueur	Largeur	Hauteur
chevaux 20	2.000	30	1.050	150/290	150/290	2.190	760	1.040
30	1.700	50	1.150	150/290	150/290	2.315	980	1.130
30	3.750	24	1.300	200/350	200/350	2.480	1.070	1.280
50	3.000	50	1.650	150/	150/	2.540	873	1.220

Dans ces modèles de turbines-pompes conjuguées, chacun des deux arbres moteurs de la turbine est accouplé à une pompe centrifuge ; les deux pompes sont liées ensemble, soit parallèlement pour doubler le débit, soit en série pour augmenter la pression du liquide refoulé. Dans le dernier cas, le liquide, qui a passé par la première pompe, est repris par la seconde, ce qui permet de lui communiquer une pression double de celle que donnerait une seule pompe, et de l'élever, par conséquent, à une hauteur beaucoup plus considérable. L'ensemble ainsi constitué peut servir alors comme pompe à incendie ou pour les hautes élévations d'eau. Sa mise en marche est facile et rapide. Son entretien est des plus simples. Les turbines-pompes ne possèdent que peu d'organes mobiles, ce qui les rend très robustes et réduit au minimum leur consommation d'huile. Les boites à étoupes sont munies d'un joint hydraulique, de sorte qu'il est matériellement impossible à l'huile de se mélanger à l'eau. Au moment de faire fonctionner la pompe, on remplit d'eau le tuyau d'aspiration et on le met aussitôt en route. S'il y a un clapet au fond de la conduite d'aspiration et que celle-ci ne soit pas vidée, pour une raison quelconque, cette précaution devient évidemment inutile et il n'y a qu'à ouvrir la valve d'admission, pour que la pompe se mette en route.

Pour les grandes pompes, on se sert de la disposition suivante.

On place un robinet sur la pompe ou la conduite de refoulement de façon à isoler l'ensemble de la première et de la conduite d'aspiration. Sur celle-ci se trouve un éjecteur à vapeur muni d'un robinet. Pour mettre en route la pompe, on ferme le premier robinet, on ouvre le second. L'air de la conduite d'aspiration et de la pompe est aussitôt entraîné par l'aspiration de la vapeur. L'eau monte dans la conduite sous la poussée de la pression atmosphérique et quand elle est remplie, l'eau sort à la place du mélange d'air et de vapeur. A ce moment, la pompe est prête à fonctionner.

On ferme le robinet de l'éjecteur, on met la vapeur sur la turbine et aussitôt que le manomètre indique que la pression monte, on ouvre le robinet placé sur la conduite de refoulement. Si le jet de la pompe vient à se relâcher, on ouvre le robinet de l'éjecteur jusqu'à ce que l'eau jaillisse.

On doit faire le graissage de préférence avec l'huile dont on se sert habituellement pour les turbines.

Le mécanisme doit être ajusté dans la boîte, de façon à fonctionner juste au milieu de l'espace compris entre les deux paliers.

Plus l'espace entre les ailes et les parois de la boîte est faible, mieux la pompe fonctionnera. Il faut faire attention à ce que la roue ne frotte pas contre la boîte.

Quand l'appareil est placé dans un endroit exposé à la gelée, il faut, quand on arrête la machine, avoir soin de vider l'eau qui peut se trouver dans los tuyaux d'échappement et de condensation de la turbine, ainsi que dans les conduites d'aspiration, de refoulement et la pompe.

Le tableau I donne les débits, les hauteurs d'élévation, les poids, les encombrements, etc., des turbines-pompes simples de 3 à 15 chevaux de puissance ; le tableau II donne les mêmes renseignements pour les turbines-pompes conjuguées parallèlement de 20 à 50 chevaux, et le tableau III pour les turbines-pompes conjuguées en série.

Turbo-pompes Rateau et Sautter-Harlé. — Dans la séance du 11 mars 1904, de la Société d'encouragement, M. Jean

Rey, ingénieur civil des mines, a fait un intéressant résumé des travaux de M. Rateau, en collaboration avec la maison Sautter Harlé et Cie, pour la création d'un nouveau système de pompes centrifuges à grande élévation.

Ces appareils permettent de résoudre la question de l'exhaure dans les mines, et, d'une manière générale, de toutes les distributions d'eau avec des pompes centrifuges commandées, soit par moteurs électriques, soit par turbines à vapeur ou par turbines hydrauliques.

Des exemples très frappants de ces dispositifs ont été signalés par M. Rey, notamment des pompes pouvant élever jusqu'à 400 mètres d'un seul jet, avec des débits variant dans de grandes limites ; le système peut d'ailleurs s'appliquer à des hauteurs pour ainsi dire illimitées.

L'emploi des turbo-pompes, combinaison d'une turbine à vapeur et d'une pompe centrifuge, imaginée par M. Rateau, permet de réaliser une économie considérable de frais de premier établissement et d'entretien, sur les groupes de pompes à vapeur employées jusqu'ici.

Les rendements indiqués, aussi bien que pour les pompes électriques que pour les pompes à vapeur, sont tout à fait remarquables et montrent que ces appareils peuvent lutter comme consommation de puissance, avec les meilleures machines à mouvement alternatif construites jusqu'à ce jour.

M. Rey a également donné des résultats comparatifs montrant les calculs d'établissement et d'essais obtenus avec les nouvelles pompes et cette comparaison a particulièrement frappé les auditeurs en montrant la perfection avec laquelle ces nouveaux engins peuvent se calculer en s'aidant des méthodes imaginées par M. Rateau. Il y a là un progrès très considérable réalisé dans notre pays, pour l'application des machines à mouvement rotatifs, qui paraissent devoir l'emporter peu à peu sur les anciennes machines à piston et à bielle, seules utilisées jusqu'à ces dernières années.

Il n'est pas inutile de faire remarquer que ces progrès sont uniquement dus à un ingénieur et à un constructeur français, dont les efforts communs ont permis d'arriver à un résultat des plus remarquables. Si, au point de vue de l'extension industrielle et de la puissance de nos usines, nous sommes dépassés

maintenant par les Etats-Unis et l'Allemagne, il est certain que c'est encore dans notre pays que l'esprit d'invention raisonnée est le plus actif et qu'il arrive aux résultats les plus intéressants par l'alliance des méthodes scientifiques rigoureuses et de l'esprit pratique que développe le contact avec l'industrie.

Pompes centrifuges à haute pression, système de Laval. — Jusqu'à ces temps derniers, on a cru que les pompes centrifuges ne se prêtaient qu'à de faibles hauteurs d'élévation (15 à 30 mètres sans être conjuguées) et qu'elles n'avaient aucune souplesse au point de vue du débit. Les recherches de ces dernières années ont démontré combien peu fondées étaient ces

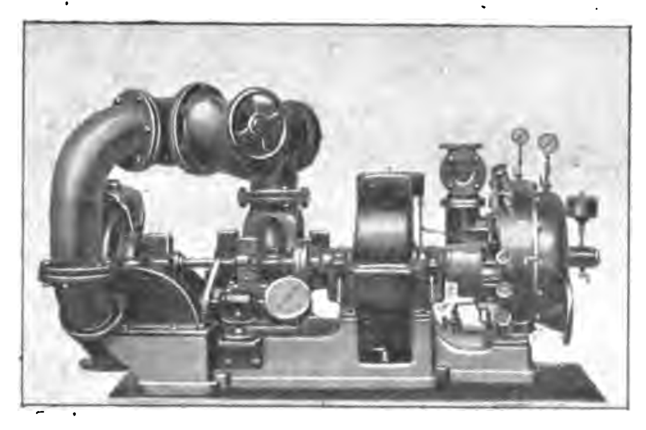


Fig. 116. — Turbine-pompe de Laval.

opinions et que les pompes centrifuges sont aussi bien susceptibles de produire de très fortes pressions, avec un bon rendement mécanique, qu'elles jouissent d'une grande élasticité. En effet, si le rendement mécanique des pompes centrifuges est un peu inférieur à celui des pompes à piston, il lui est tout à fait comparable quand on envisage des groupes élévatoires complets, moteur et pompe. Alors qu'une pompe centrifuge peut être directement attelée à une turbine motrice qui épouse sa vitesse, une pompe à piston exige des organes intermédiaires qui entraînent un abaissement de rendement.

Les groupes élévatoires à pompe centrifuge présentent en outre, certains avantages qui peuvent les rendre préférables à ces der-

niers. Ils sont moins encombrants et exigent des frais d'installation beaucoup moins élevés, ils demandent moins de soins et moins d'entretien, ils fonctionnent sans choc et leur couple au démarrage est faible, ce qui peut avoir son importance.

On peut admettre, d'une façon générale, que plus la hauteur d'élévation est grande plus le nombre de tours d'une pompe centrifuge doit être élevé.

Pour les grandes élévations le mieux est, par conséquent, d'accoupler la pompe directement à l'arbre de la turbine motrice dont le nombre de tours est très élevé.

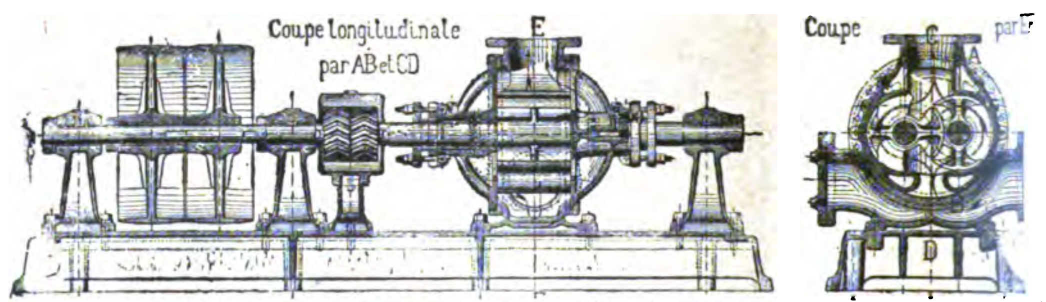


Fig. 117 et 118. — Pompe centrifuge Poil'on (Locnge et Rocbart).

Etant donné ce nombre de tours très élevé, la roue de la pompe se trouve réduite à de très petites dimensions, ce qui entraîne forcément aussi la réduction de la section d'aspiration. Aussi, quand il s'agit des grands débits, en même temps que des grandes hauteurs d'élévation, on adjoint à la pompe principale une pompe auxiliaire montée sur l'arbre secondaire de la turbine et tournant à une vitesse dix fois moindre.

Cette pompe auxiliaire peut avoir des dimensions convenables pour aspirer la quantité d'eau voulue et la fournir sous faible pression à la pompe à grande vitesse. Elle peut subsidiairement alimenter un condenseur à jet qui exige l'eau sous pression de 6 mètres.

Avec des formes et dimensions appropriées et avec ces très grandes vitesses, on peut obtenir des hauteurs d'élévations de 150 mètres et au-dessus, et plusieurs centaines de mètres pour des pompes conjuguées.

Pompes rotatives. — De même que pour la rotative à vapeur, il n'est peut-être pas de machine qui ait autant exercé l'imagination des inventeurs ; aussi en trouve-t-on de nombreux systèmes dans le commerce. En général, ces pompes se composent d'une boite cylindrique ou elliptique formée d'un corps et de deux joues réunies par des boulons ; l'organe interne est un tambour excentré ou une palette frottant sur la paroi interne de la boite et refoulant l'eau devant elle. Ce dispositif est des plus simples, mais presque tous les types connus présentent un sérieux inconvénient résultant de ce que le passage de l'eau se trouve gêné, à certaines périodes du mouvement, les sections d'écoulement étant insuffisantes. Cette gêne occasionne des pertes de travail considérables, et souvent des chocs ; aussi, en général, les pompes rotatives ne sont-elles construites que sous de petites dimensions et en vue de débits restreints. Un seul système est débarrassé de ces défauts ; étudié minutieusement par des ingénieurs du plus haut mérite, il donne des rendements très satisfaisants ; c'est la pompe Greindl dont nous donnerons la description succincte.

La pompe Greindl (fig. 117) se compose d'une double boite cylindrique, formant comme les deux cylindres de la pompe. Ces deux cylindres, intérieurement alésés, sont constitués par deux fonds dressés. Ils contiennent deux rouleaux cylindriques mobiles sur leur axe et formés de deux palettes et de deux échancrures ; les unes passent dans les autres sans cesser d'avoir contact (disposition déjà remarquée dans la machine Behrens et dans le moteur à gaz tonnant de Chaudun). Le travail ne s'effectue que dans un sens. Les deux rouleaux tournent ensemble, mais en sens contraire, étant maintenus en exacte correspondance par une paire d'engrenages égaux, à chevrons simples ou multiples calés sur les deux axes.

Dans le type de pompe Greindl construit par MM. Locoge et Rochart, de Lille, chacune des palettes ou rouleaux fait office de pistons et entre alternativement dans l'échancrure correspondante, de forme épicycloïdale, ménagée sur toute la longueur des rouleaux suivant une forte traverse convexe présentant aux pistons une épaisseur centrale plus grande qu'aux extrémités qui doivent être dégagées. Les engrenages, calés et rodés avec soin, donnent aux rouleaux des positions invariables et leur impriment une vitesse égale, cette condition assure le fonctionnement réci-

proque des rouleaux sans danger de rencontres ou frottements imprévus.

Dans les moments où le passage de l'échancrure interrompt le contact avec la travaillante fixe, la palette opposée le reproduit, et quand l'extrémité d'une palette échappe au contact de la périphérie centrale, l'autre palette du rouleau opposé le reconstitue sur la périphérie de l'arbre du premier rouleau. Il y a donc contact constant et séparation absolue entre les chambres d'aspiration et de refoulement. Les contacts ne sont pas rigoureux et ne donnent lieu qu'à des frottements insignifiants. Il existe même un certain jeu entre tous les contacts et l'eau qui s'y glisse sans passer au delà, calfate en quelque sorte ces fuites et assure une étanchéité parfaite.

Les calages des engrenages sont faits de telle sorte que même l'usure de leurs dents ne peut devenir, à moins de besoin de remplacement signalé, une cause de rencontre des deux rouleaux-pistons.

Les sections offertes au passage de l'eau, tant du côté de l'aspiration que du côté du refoulement sont telles, que les évacuations des quantités refoulées et les introductions des quantités aspirées font qu'une molécule d'eau traversant l'appareil y conserve une vitesse sensiblement constante et uniforme, ce qui exclut toutes pertes de travail dues à l'inertie. A cet effet, dans les moments où les sections d'afflux ou d'échappement offertes à l'eau, entre les organes en mouvement, décroissent et tendent à nécessiter une accélération des filets liquides, ceux-ci trouvent, par des poches latérales ménagées aux couvercles, des issues supplémentaires. C'est cette disposition qui caractérise les *pompes Greindl*, et assure l'uniformité de l'eau dans la machine. Les intermittences et les effets d'inertie étant ainsi évités, il s'ensuit que pour un même appareil, on peut faire varier dans de sensibles limites, la vitesse de rotation, le débit réalisé et le travail dépensé, sans que l'effet utile subisse de trop grandes variations.

La pompe Greindl aspire et refoule les gaz aussi bien que les liquides, elle est insensible aux rentrées d'air et s'amorce d'elle-même. Elle peut même aspirer et refouler simultanément de l'air et de l'eau, ce qui la rend propre au service de pompe de condensation des machines à vapeur, où elle se combine facilement à un condenseur à injection ou à surface et dans cette application, elle

peut rendre de grands services aux moteurs à grande vitesse, qui ne peuvent sans danger actionner des pompes à marche rectiligne alternative. Elle peut aussi facilement, ses pistons nettoyés dans l'eau ou dans l'huile, servir à la production de vides de 70 mètres, et plus de mercure, et à la compression de l'air et du gaz dans une mesure assez grande et jusqu'à 5 et 6 kilogrammes par exemple.

Ses facilités d'aspirer et de refouler simultanément de l'air et des liquides la rendent précieuse dans certains cas industriels comme celui de teinture en bobine par exemple en la faisant alternative. Elle tourne dans un sens en prenant la teinture d'un bain, elle l'injecte à pression voulue quelconque par l'intérieur des bobines puis sa marche renversée, elle reprend le bain qu'elle injecte extérieurement et puis enfin injectant de l'air, elle oxyde les matières colorantes et les fixe. Elle peut également s'employer pour l'extinction des incendies, car elle utilise intégralement la pression des eaux distribués et sans perte de charge, ce que ne peut faire aucune autre pompe. Pour cette application, elle peut être commandée directement par toute espèce de moteur à vapeur, électrique ou à pétrole. Son rendement est très élevé : pour des hauteurs moyennes entre 20 et 30 mètres, il varie entre 80 et 95 0/0. Pour des hauteurs de refoulement plus considérables, on peut conjuguer plusieurs corps de pompes, injectant les unes dans les autres. Le rendement théorique est encore, dans ces conditions, supérieur à 70 0/0.

Sous cette forme multiple ou sous la forme simple ordinaire, elle peut servir comme pompe à eau forcée, par exemple pour refoulement des boues de port à grande distance. Enfin, étudiée spécialement, elle peut devenir une bonne machine motrice, à eau, notamment mais aussi bien à vapeur ou à air comprimé. Elle est donc réversible, et ces diverses qualités montrent bien quelles peuvent être les multiples applications de ce modèle de pompe, véritablement remarquable à tous les points de vue, et dont la construction est irréprochable.

Turbo-propulseur Marchand. — Sous ce nom, un ingénieur civil, M. Marchand, a réalisé une pompe rotative dans laquelle, contrairement à ce qui a lieu généralement, l'eau s'échappe suivant l'axe même de l'appareil, après avoir parcouru à l'intérieur le chemin minimum nécessaire pour créer une force centrifuge et

augmenter la vitesse du liquide : les pertes de charge se trouvent, de ce fait, très notablement diminuées, et le rendement mécanique accru proportionnellement.

De cette pompe, applicable à tous les usages ordinaires, M. Marchand a déduit un turbo-propulseur qui offre sur les systèmes antérieurs un avantage de premier ordre : par un simple déplacement longitudinal des organes mobiles, le sens d'écoulement de l'eau est renversé ; l'aspiration se transforme en refoulement et *vice-versa*. C'est donc une solution élégante et pratique du problème de la marche-arrière indispensable à tout propulseur de bateau, et ce renversement de marche est obtenu de la façon la plus simple, puisque le sens de rotation du moteur et de la turbine reste constamment le même.

Le perfectionnement apporté par M. Marchand à la pompe centrifuge n'impose aucune modification essentielle à l'organe prin-

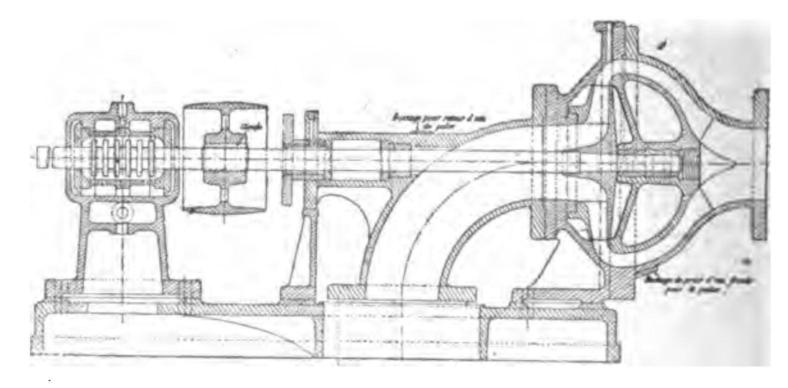


Fig. 119. — Pompe centrifuge de Marchand.

cipal de l'appareil, la couronne mobile portant les aubes élévatoires reste conforme au traité classique, que la théorie et l'expérience ont conduit généralement à adopter. L'amélioration de la pompe résulte simplement des précautions prises pour recueillir les filets fluides à la sortie des aubes. Dans la plupart des pompes centrifuges, l'eau chassée dans toutes les directions par l'organe mobile, perd en agitations la vitesse qu'elle possède encore à la sortie ; après quoi elle doit reprendre dans le tuyau ascensionnel une vitesse appréciable, qui l'amène au réservoir supérieur. Au lieu de laisser ainsi s'entre-choquer les filets liquides, M. Mar-

chand leur ouvre des canaux directeurs qui le font converger vers l'entrée du tuyau destiné à les recueillir. Il place à cet effet, à proximité des orifices extérieurs de la couronne, un cône fixe dont la base a le diamètre même de cette couronne et lui a accolée à faible distance; le sommet du cône est placé en face de l'ouverture du tuyau ascensionnel. Des cloisons directrices gauches découpant obliquement à intervalles égaux la surface du cône, constituent les parois latérales le long desquelles l'eau doit glisser. Une seconde surface conique ferme des canaux et les transforme en véritables conduits. Le tracé de ces diverses surfaces est d'ailleurs tellement ménagé que la déviation qu'elles imposent aux filets liquides s'opère sans choc ni brisure, depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Les frottements développés au contact des filets et de leurs surfaces directrices ont une minime importance, eu égard à la petitesse et à la régularité des vitesses, surtout si on les compare aux collisions des filets abandonnés à eux-mêmes et animés de vitesses dirigées dans tous les sens.

Quelques améliorations de détail assurent d'ailleurs la bonne tenue de l'appareil. Des matelas d'eau dormante sont ménagés, dans certaines parties de la machine, pour équilibrer la couronne mobile et éviter les poussées longitudinales sur les paliers de l'arbre tournant. Des joints hydrauliques soigneusement profilés préviennent les fuites du liquide à l'extérieur.

La maison Popineau, Vizet fils et Cie a admis deux séries principales de pompes Marchand. La série basse sert à élever l'eau à une hauteur limitée à 12 ou 15 mètres ; la série haute comprend les pompes destinées à franchir des hauteurs de 12 à 100 mètres et au delà. Chaque série se subdivise en plusieurs numéros, suivant le diamètre de la turbine et le débit à fournir.

La série haute en contient 7, avec des diamètres variables, de 240 millimètres à $1^m.9$, et débitant 5 à 190 litres.

Le modèle général de la turbine Marchand se prête à toutes les exigences et peut être adopté, semble-t-il, dans les circonstances les plus variées. La turbine élévatoire peut, comme on sait, fonctionner à plat ou dans un plan quelconque, vertical ou incliné. Un simple démontage de boulons permet d'orienter dans tel sens qu'on voudra, le coude qui réunit le tuyau d'aspiration à l'appareil.

M. Marchand a fait une application de son type de pompe à la

propulsion des bateaux sur les canaux et rivières. On sait qu'en renversant un appareil élévatoire, on obtient soit un récepteur, soit un propulseur. C'est ce dernier emploi que M. Marchand a réalisé. Son hélice, placée à l'intérieur du bateau dans un tuyau isolé, ne communique plus au liquide extérieur le mouvement giratoire qui, dans les applications ordinaires, attaque et corrode les berges, et fait proscrire les bateaux à vapeur sur les canaux.

Le propulseur centrifuge hydraulique de M. Marchand a été appliqué à un bateau de 14 mètres de longueur, de $2^m,25$ de largeur au maître-couple et de $0^m,70$ environ de tirant d'eau. C'est à Asnières, sur la Seine, que se font les expériences.

L'appareil consiste en deux turbines accouplées et complètement indépendantes au point de vue du travail effectué de façon que l'on peut à volonté immobiliser le travail de l'une, l'autre seule travaillant utilement. La chambre des turbines est placée entre deux tuyaux : l'un d'eux livre passage à l'eau aspirée par le mouvement de la turbine ; l'autre reçoit l'eau lorsque, refoulée par la turbine après aspiration, elle est rejetée dans le courant. Ce refoulement du jet liquide dans la masse produit, en sens inverse de son mouvement, une réaction qui entraîne la marche du bateau.

L'arbre moteur peut glisser dans un presse-étoupes et dans une douille carrée par l'intermédiaire d'un pignon actionnant une crémaillère. C'est ce déplacement axial qui, permettant de mettre en action à volonté l'une ou l'autre des turbines, a comme conséquence le refoulement de l'eau de l'arrière vers l'avant ou de l'avant vers l'arrière, et par conséquent le changement de marche.

Supposons, par exemple, que le propulseur soit placé à l'arrière du bateau et qu'on ait fait glisser l'arbre dans la direction de l'arrière. La turbine arrière n'effectue aucun travail ; l'autre, au contraire, sera mise en action, aspirera l'eau comme une pompe centrifuge de l'avant vers l'arrière, puis la refoulera vers l'arrière et provoquera par réaction la marche en avant.

Si, au contraire, nous faisons glisser l'arbre dans la direction de l'avant, la turbine avant n'exécutera plus aucun travail et c'est l'autre qui entrera en action ; l'eau sera aspirée de l'arrière vers l'avant et déterminera par conséquent la marche en arrière. La simplicité de ce changement de marche est une des caractéristiques du système Marchand.

Au point de vue du *rendement*, théoriquement au moins il est supérieur à celui de l'hélice. Dans ce propulseur, une grande partie de la force vive est absorbée en pure perte par des chocs, et si, au lieu des turbines employées on se servait d'une hélice enfermée dans un tube, la force centrifuge développée rejetant violemment l'eau contre les parois, les lames liquides viendraient s'entrechoquer normalement à ces parois et neutraliser en partie le travail utile, tandis que, dans l'invention de M. Marchand, l'eau se trouve ramenée dans la direction de l'axe ; le rendement se trouve donc accru.

La régularité de marche provient de ce fait que la poussée de laquelle dépend la marche du bateau est liée au nombre de tours de la turbine. En maintenant constant ce nombre de tours, on maintient la vitesse également constante ; en l'augmentant ou en la diminuant, on augmente ou on diminue à volonté cette vitesse. On peut donc régler avec la plus grande précision la marche du navire ainsi actionné ; ce qu'il est plus difficile de réaliser, avec l'hélice ou des roues à aubes employées comme propulseurs. Le rendement mécanique augmente avec la vitesse de rotation de la turbine ; avec l'hélice, au contraire, le rendement diminue plutôt quand cette vitesse dépasse le chiffre fixé. De plus, alors qu'avec l'hélice ou les roues, le bâtiment est soumis à de fortes trépidations et qu'il produit des remous souvent gênants, avec la turbine-propulseur Marchand, on obtient une très grande douceur de marche sans vagues ni remous. Il n'y a plus à craindre les emballements du moteur qui se produisent lorsque, par l'effet du tangage l'hélice émerge en partie hors de l'eau, ce qui est un danger de rupture de pièces. Enfin, un autre avantage réside dans l'utilisation du propulseur dans les bateaux plats et les faibles tirants d'eau. Le mécanisme se prête à toutes les combinaisons ; il peut être disposé, en tout ou en partie, au-dessus de la ligne de flottaison ; il peut être placé sur le bateau ou sur ses flancs, à l'avant ou à l'arrière. On peut installer plusieurs propulseurs, soit à tribord, soit à bâbord à volonté.

Ajoutons, en ce qui concerne surtout les navires de guerre, que l'appareil, étant placé à l'intérieur, est à l'abri, non seulement des chocs, mais encore des projectiles.

Les données du yacht *Le Fred*, sur lequel ont été faites les premières expériences, sont les suivantes : longueur à la flottai-

son $14^{m},20$; largeur au maître-couple, $0^{m},70$; déplacement total, avec six voyageurs, 11 tonnes. Le moteur employé, du type compound vertical, avait un diamètre du petit cylindre, de 97 millimètres, un diamètre du grand cylindre de 134 millimètres, une course de 145 millimètres ; l'admission au petit cylindre était de 70 0/0 et la pression au petit cylindre de 7 kilogrammes, le nombre de tours par minute de 290, et la puissance indiquée de 13 à 14 chevaux.

Le propulseur Marchand, simple et robuste, peu encombrant, facile à surveiller et à réparer, peut se placer en un point quelconque du bateau et même en surélévation en le munissant d'un amorceur ; on peut en disposer plusieurs sur le même bateau dans le but d'augmenter la vitesse ou de faciliter la marche.

Cet appareil fait faire un grand pas au problème de la propulsion hydraulique des navires, problème déjà étudié par de nombreux chercheurs ; aussi nous ferons-nous un devoir de suivre de près les nouvelles expériences actuellement projetées et de tenir nos lecteurs au courant des résultats qui seront obtenus.

Nous sommes d'ailleurs certain que l'on doit obtenir, avec le propulseur Marchand, un rendement notablement supérieur à celui que donne l'hélice. L'inventeur affirme que son système est tout spécialement recommandable pour les très grandes vitesses, notamment pour les paquebots, torpilleurs, etc., et on ne peut que souhaiter de voir ces vues confirmées par des applications répétées, ce qui n'a pas encore été fait, naturellement jusqu'ici.

Pompe rotative bihélicoïde Gelée. — Considérant qu'en mécanique le mouvement rotatif est toujours considéré en principe comme plus avantageux que le mouvement alternatif, surtout quand il s'agit de l'élévation des eaux où l'égorgement des soupapes et les coups de bélier sont toujours à craindre à chaque changement de course du ou des pistons. Mais que d'un autre côté les pompes centrifuges même les meilleures connues demandent une trop grande vitesse de rotation, ce qui les empêche à moins d'en conjuguer un grand nombre, d'élever l'eau à une hauteur relativement considérable en diminuant d'autant leur rendement. D'où l'idée de cette nouvelle pompe qui est, avec une vitesse de rotation très modérée, de lui donner la plus grande force de refoulement possible malgré l'absence totale de tout

joint étanche, le tout dans les meilleures conditions pratiques d'économie de force de motrice.

Conséquemment, cette nouvelle pompe se compose d'un corps de pompe tronconique allant en s'évasant du côté de son plus grand diamètre, autour duquel est tracé un pas de vis de plus en plus profond et bien marqué sur une surface polie avec soin, ensuite d'un piston se composant également d'une vis dont le pas est dirigé de même que celui de l'enveloppe de bas en haut et de telle sorte que les plans de la vis centrale de propulsion fassent constamment un angle de refoulement avec l'hélice tracée dans le corps de la pompe.

La caractéristique de cette invention étant : que si l'eau à élever tend à tourner tout d'une pièce dans le filet de la vis centrale, ce qui paralyserait en grande partie son effet propulsif, la centrifuge l'envoyant en pression dans le pas de vis de l'enveloppe : que d'un sens comme de l'autre, l'eau soit obligée d'avancer, et c'est même ce qui donne à cette pompe sa grande force de refoulement.

L'eau entre par la prise A et sort par le tuyau de refoulement B placé sur la tangente en prolongement du pas de vis de l'enve-

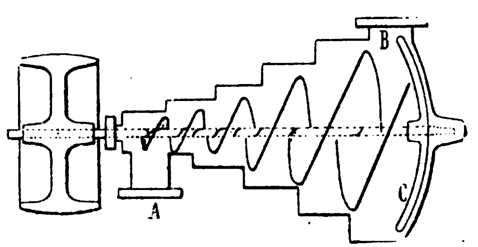


Fig. 120. — Pompe bihélicoïde Geléo.

loppe. C'est un disque destiné à diminuer le frottement de l'eau en pression de refoulement sur le plateau de fond de la pompe.

En résumé, cette pompe tiendrait encore de la pompe centrifuge proprement dite, si ce n'est qu'elle a cet avantage sur cette dernière, que la force propulsive considérable de sa double vis vient s'ajouter à l'effort centrifuge, ce qui permet de la faire mouvoir beaucoup plus facilement par l'action directe d'un moteur, tout en permettant avec une seule pompe d'élever l'eau à une plus grande hauteur.

Pompe centrifuge à haute pression, de MM. Sulzer,

frères. — La maison bien connue Sulzer frères, a employé récemment, pour le service de l'exhaure dans les mines, un système de pompe centrifuge à haute pression, qui présente pour ce genre d'applications de sérieux avantages, au double point de vue de la facilité du transport en masses relativement légères, et de la possibilité de l'installer sur des emplacements restreints ne nécessitant pas la création de vastes chambres souterraines, toujours faciles à ventiler.

Cette pompe (fig. 121 et 122) est constituée par quatre turbines $f_1 f_2 f_3 f_4$ disposées par paires sur un même axe et de chaque côté des deux cloisons circonférentielles $l_1\ l_2$, fixées à l'enveloppe.

Deux tubulures *a* sont disposées symétriquement de part et

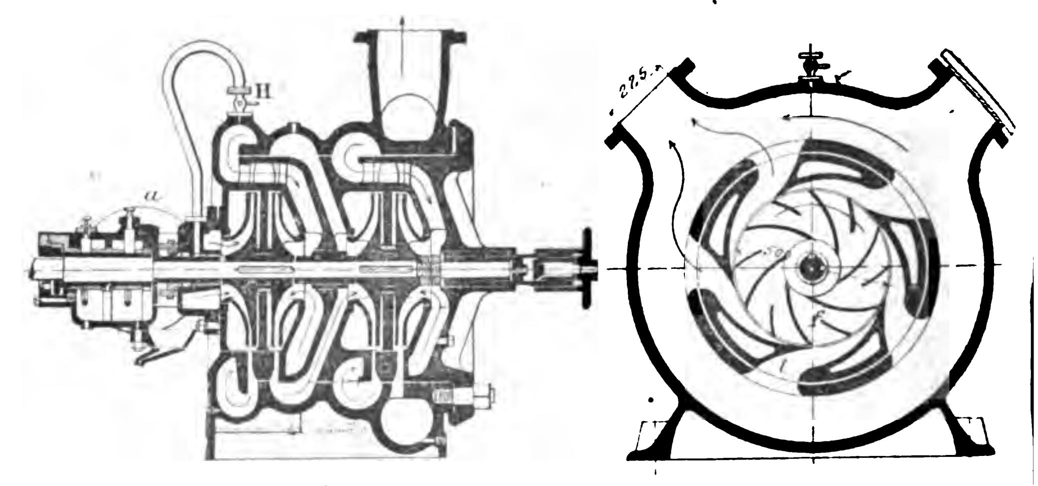


Fig. 121 et 122 — Pompe multiple centrifuge (coupe).

d'autre de l'arbre de la pompe ; suivant les circonstances locales, à l'une ou à l'autre de ces tubulures est jointe la tubulure d'aspiration, qui est verticale, comme le montre la figure où elle est représentée entre la pompe et son moteur électrique. La tubulure inutilisée est fermée par un couvercle.

L'eau aspirée suit les parcours indiqués par les flèches, c'est-à-dire qu'elle passe de la première turbine à la deuxième, et de celle-ci à la troisième qui, à son tour, l'envoie à la quatrième mise en communication avec le refoulement. Des aubes, venues de fonte avec les cloisons $l_1\ l_2$, servent de directrices, et en même

temps transforment la puissance vive du liquide en pression ; aussi, le refoulement peut-il atteindre une grande hauteur. De même qu'à l'aspiration, on a ménagé, du côté du refoulement, deux tubulures dont la plus favorable à la pose de la conduite est seule utilisée. Ces tubulures sont disposées à 45° de part et d'autre de l'axe de symétrie, afin de permettre le passage d'un palan pour le montage et le démontage de la pompe.

La réaction de l'eau produit sur les paliers une poussée horizontale de droite à gauche, qui est annulée au moyen d'une butée à billes ; celle-ci est située au delà du palier de gauche, pourvu d'un graissage à bagues et disposé dans la chambre même d'aspiration, tandis que le palier de droite est venu de fonte avec le fond mobile de la pompe et lubrifié par un graisseur Stauffer. Le presse-étoupes à travers lequel l'arbre pénètre dans le corps de pompe est mis en communication par un robinet et un tuyau recourbé avec la première chambre de refoulement ; il est, par suite, toujours rempli d'eau, ce qui empêche toute rentrée d'air. Des purgeurs d'air disposés sur la deuxième et la quatrième chambres de pression, facilitent le remplissage à la mise en train ; on les munit aussi de manomètres permettant d'y lire la pression.

Une application de ces pompes a été faite dans les mines de plomb argentifère de l'Horcajo (Espagne) pour l'épuisement des eaux à une profondeur de 390 mètres. Le puits comporte trois pompes quadruples à haute pression, de 50 centimètres de diamètre, disposées en relais ou en cascade. Bien que ces pompes fonctionnent nuit et jour, leur arrêt n'est nécessaire que tous les deux ou trois mois ; on leur fait alors subir un nettoyage qui demande quatre ou cinq heures au plus, le démontage étant très facile. On change en même temps le bourrage du presse-étoupes et la douille de celui-ci qui s'use par suite de la grande vitesse de rotation. Une crépine établie au pied de la conduite d'aspiration empêche toute introduction de corps étrangers dans les pompes. Grâce à ces précautions, les turbines et les directrices sont mises à l'abri d'une usure rapide, bien que l'eau soit non seulement bourbeuse, mais souvent chargée de quartz.

Les moteurs électriques commandant ces pompes sont blindés pour que leurs organes se trouvent protégés contre l'humidité des chambres souterraines ; ils sont construits par la célèbre maison Brown-Boveri, concessionnaire pour le continent des turbo-mo-

teurs Parsons, et ils développent une puissance de 250 chevaux avec un rendement de 94 0/0 à pleine charge et 92 à demi-charge.

Quant aux pompes, elles ont été soumises, dans les ateliers de Winterthur à des essais qui ont donné un effet utile de 76 0/0 avec un débit de 4.200 litres par minute pour une hauteur de refoulement de 130 mètres et une vitesse de rotation de 900 tours par minute, ce qui constitue un résultat en réalité très satisfaisant.

Pompe radiale. — Nous donnons encore la vue (fig. 123) d'un modèle de pompe centrifuge dite « radiale » qui n'a eu toutefois qu'une vogue éphémère il y a quelques années. Comme le montre la figure, ce système diffère des précédents par le procédé d'assemblage des divers organes permettant un démontage facile et une

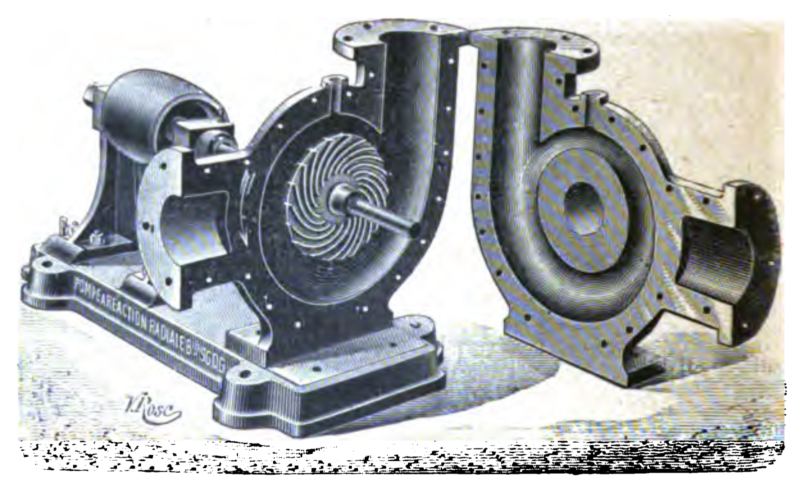


Fig. 123. — Pompe à réaction radiale (coupe montrant l'organe mobile)

visite aisée de la roue à aubes. La société qui exploitait cette pompe s'étant dissoute, on ne trouve plus ce modèle dans l'industrie, aussi ne le citons-nous ici qu'à titre de mémoire et surtout pour donner une vue générale aussi complète que possible de la question des pompes centrifuges.

VENTILATEURS CENTRIFUGES

On donne le nom de ventilateurs centrifuges à des machines soufflantes particulières dans lesquelles l'organe principal est

une turbine ou roue à aubes analogue à celle que l'on rencontre dans les pompes centrifuges que nous venons d'étudier. Le but de ces ventilateurs est de refouler de l'air à une aussi haute pression que possible, dans une conduite amenant cet air à l'endroit d'utilisation. On fait aussi des appareils du même genre fonctionnant par aspiration et non par pression, tels sont les ventilateurs dits *à tirage induit* employés pour provoquer artificiellement le tirage dans le foyer des chaudières à vapeur.

Jusqu'à ces derniers temps, on était habitué à ne demander aux ventilateurs centrifuges que des pressions ou des dépressions inférieures à 500 millimètres d'eau, et dans des circonstances tout à fait exceptionnelles, 60 ou 70 centimètres de pression. Cependant M. l'ingénieur Rateau, dont nous avons passé en revue, au cours de cet ouvrage, les recherches sur les turbo-machines,

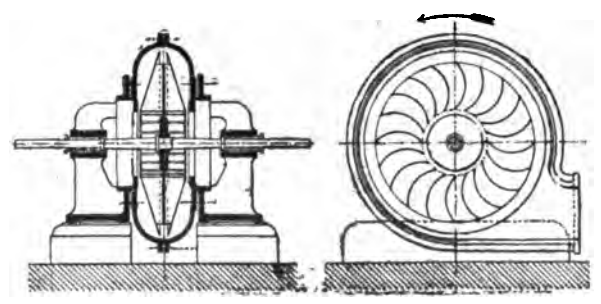


Fig. 124 et 125. — Ventilateur centrifuge (coupes).

est parvenu, en accouplant une roue de ventilateur convenablement construite, à une turbine à vapeur à grande vitesse, à obtenir une pression dix fois plus élevée, et à faire ainsi des machines à force centrifuge qui sont de véritables compresseurs, résultat qui n'avait pu être atteint jusqu'à présent par aucun constructeur. De même avec une roue mobile ne mesurant pas plus de 8 centimètres de diamètre, il a pu élever de l'eau à 300 mètres de hauteur avec une pompe centrifuge basée sur les mêmes principes.

Les systèmes de ventilateurs centrifuges les plus en usage actuellement et employés dans diverses industries pour assurer la circulation de l'air, évacuer les gaz ou les poussières incommodes, etc., peuvent être divisés en trois classes :

Les ventilateurs *à force centrifuge ;*

Les ventilateurs *à hélices* ou *hélicoïdes ;*

Les ventilateurs *à capacité variable*.

Nous ne nous occuperons ici que de ceux appartenant à la première catégorie et qui rentrent plus directement dans le sujet que nous traitons.

Il existe d'assez nombreux systèmes de ventilateurs centrifuges présentant des particularités intéressantes et méritant que nous nous y arrêtions un instant. Toutefois il nous paraît nécessaire, avant de donner leur description, de rappeler succinctement les lois établies pour la construction et le calcul de ces appareils :

Soient Q la quantité d'air à injecter par seconde, en *mc*; V la vitesse d'écoulement par la buse, en mètres ; H la charge corresdante à la pression de l'air, évaluée en mètres de hauteur d'eau ; on a $V = \sqrt{2g \times 800\,H}$ (800 est le rapport des hauteurs des colonnes d'air et d'eau, qui correspondent à une même pression, et pour une même température de 10°). Dans les tuyaux de refoulement, l'air doit avoir une vitesse de 3 à 6 mètres par seconde, maximum 10 mètres. L'air est introduit au ventilateur par un ou deux œillards, dont le diamètre varie, depuis la moitié du diamètre de la roue à ailettes ou turbine (pour les faibles pressions), jusqu'à 1/5 ou 1/6 de ce diamètre pour des pressions atteignant $0^{m},75$ à 1 mètre de hauteur d'eau. L'expérience prouve qu'en général, la suppression h de l'air à la sortie des ailettes de la turbine est bien celle qui correspond à la vitesse v de la circonférence de cette turbine, $v = \sqrt{2gh \times 800}$.

Le rendement des ventilateurs est en général faible : 15 à 25 °/₀ ; toutefois on peut obtenir jusqu'à 60 °/₀. Cette perte considérable paraît due aux remous et tourbillonnements qui se produisent dans l'enveloppe, au sortir des ailettes. En admettant un rendement de 30 °/₀, le travail nécessaire en chevaux-vapeur est $N = 44,4\,HQ$, ou $444\,p\,Q$, si la pression p est donnée en kilogrammes par *cq*. Exprimé en kilogrammètres, le travail dépensé est théoriquement égal au produit Qh, h étant la pression en millimètres d'eau. On devra tripler ou quadrupler ce produit, pour avoir le travail moteur ordinaire.

Pour une forge ordinaire, il faut compter 0,033 *m. c.* d'air par seconde ou 120 *m. c.* par heure ; par tonne de fonte de fer, au cubilot 800 à 1.000 *m. c.*

Les systèmes de ventilateurs centrifuges actuellement en service dans l'industrie sont assez nombreux ; nous nous bornerons à dé-

crire les types présentant les particularités les plus intéressantes, combinés par Farcot, d'Anthonay et Fouché.

Ventilateurs Farcot. — Ces ventilateurs sont divisés en trois classes, suivant le diamètre de l'œillard par rapport à la turbine. Cet œillard est d'autant plus petit qu'on veut obtenir une pression plus considérable. Les ventilateurs des deux premières catégories sont à courbe constante en forme de spirale. La turbine a ses aubes recourbées dans le sens de la rotation, et son extrémité tourne dans une enveloppe concentrique. L'air se trouve comprimé à la pression correspondante au nombre de tours, et s'échappe de côté, tournant en hélice, suivant les buses de sortie placées latéralement. Par cette disposition, on évite le ronflement et le bruit et on obtient un débit régulier.

Les ventilateurs de la troisième classe sont du type à réaction ; la turbine est constituée par des aubes dont l'extrémité est recourbée en sens inverse du sens de la rotation, l'air sortant presque à l'état de repos. Ils peuvent fonctionner avec ou sans enveloppe. Dans le cas d'une enveloppe, il y a intérêt à la faire en colimaçon, de façon à réduire la vitesse de sortie et à utiliser la détente de l'air.

En dehors des trois types ci-dessus, il existe un quatrième genre de ventilateur, dit *déplaceur d'air*, à très grand volume, et très faible pression ou dépression, de $-0^{m},030$ à $+0^{m},030$ de colonne d'eau. Cet appareil n'est pas à force centrifuge, et fait partie de la catégorie des ventilateurs à hélice. Ses ailes sont inclinées sur l'axe, de façon à diminuer l'action de la force centrifuge. On évite ainsi les remous et l'on obtient un meilleur rendement.

Ventilateurs soufflants pour forges, fonderies, etc. système d'Anthonay. — Ils se composent essentiellement d'une turbine à aubes recourbées dans le sens de la rotation, et laissant à la circonférence, entre les deux tôles coniques qui comprennent les ailes, un espace annulaire constituant un réservoir d'air en pression qui permet d'obtenir un écoulement uniforme, et par là de supprimer le ronflement.

La pression de l'air est sensiblement égale à celle qui correspond à la vitesse de la circonférence de la turbine. Il suffit donc de prendre, sur la table suivante, la vitesse de l'air sortant d'un réservoir à une pression donnée (en hauteur d'eau), pour avoir la

vitesse de la turbine à sa circonférence et, par suite, le nombre de tours, d'après le diamètre adopté. La section d'ouverture, sur le pourtour de la turbine, est égale à la section de la buse. Le rendement atteint 0,60, lorsque la section de débit utile est égale à la moitié de la section de la buse.

Les ventilateurs aspirants, à réaction, du même constructeur, tournent dans l'air libre sans aucune enveloppe. Ils se composent d'une turbine analogue à celle des systèmes précédents, mais dont les aubes se prolongent pour former une roue à réaction, inclinée en sens inverse du mouvement de rotation, afin de n'évacuer l'air qu'avec une très faible vitesse absolue.

L'expérience a montré que la pression ou dépression obtenue correspond à la vitesse du point des aubes, situé à la naissance des orifices de réaction, c'est-à-dire au jarret de la courbe; le diamètre correspondant est environ les 0,8 du diamètre extérieur, et c'est cette valeur qu'il faut introduire dans le calcul de nombre de tours.

Ventilateurs hélicoïdaux, système Fouché. — On peut employer avec avantage pour la ventilation, et à des pressions (ou dépressions) ne dépassant pas 35 millimètres, les ventilateurs formés d'ailes hélicoïdes et placés dans une enveloppe cylindrique. Leur rendement en volume atteint 60 à 70 0/0. L'enveloppe, ainsi que les deux cônes qui terminent le noyau, sont nécessaires au bon fonctionnement. On fait faire à ces ventilateurs de 300 à 700 tours par minute. Ils peuvent tourner indifféremment dans les deux sens, ce qui permet, au besoin, de changer le sens de la ventilation, suivant les saisons, en croisant les courroies.

Ces ventilateurs sont spécialement propres à déplacer de très grands volumes d'air. Le travail consommé varie à peu près, pour le même ventilateur, comme le cube de la vitesse. Le travail effectif a pour mesure le produit du volume débité, par la différence de pression d'un côté à l'autre du ventilateur, dans la conduite. Le rendement en travail augmente avec la différence des pressions; il est d'environ 0,5 pour 5 à 10 millimètres d'eau, et peut atteindre 0,6 pour 25 millimètres d'eau environ.

Ils sont employés surtout par des aérages, chauffages et séchages, avec des différences de pression de 5 à 20 millimètres en hauteur d'eau.

Il est nécessaire, pour chaque application spéciale, d'après le volume d'air à fournir et la différence de pression à produire, de choisir les valeurs les plus favorables pour le pas des ailes, leur surface, le diamètre de l'enveloppe et celui du noyau, la forme de ces parties, la vitesse, etc., et cela d'après les expériences antérieures. Autrement on s'exposerait à des mécomptes certains dans le rendement.

La roue du ventilateur fait à peu près joint avec l'enveloppe, en tournant dans une rondelle ajustée en carton. C'est ce qui permet d'obtenir des pressions relativement fortes.

Les ventilateurs à hélice déplacent l'air en n'occasionnant qu'un minimum de tourbillonnements dans la veine fluide ; c'est ce qui explique la raison de leur rendement avantageux.

Ventilateur Roots. — Cet appareil est basé exactement sur le même principe que la pompe Greindl décrite plus haut, et que la machine rotative Behrens. L'organe tournant se compose de deux véritables roues d'engrenages, ayant chacune deux dents, engrenant ensemble et tournant dans une enveloppe alésée avec le moindre jeu possible. Les parties extérieures des grandes dents forment piston et refoulent l'air vers la buse de sortie. Les axes

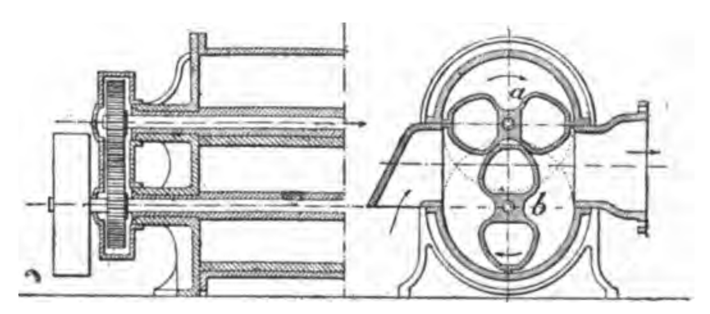


Fig. 126 et 127. —Ventilateur Rootz (Coupes transversale et latérale).

de ces deux pièces portent deux roues d'engrenages ordinaires, en dehors de l'appareil, une à chaque extrémité ; ces engrenages servent à assurer la concordance du mouvement des dents intérieures sans qu'elles exercent de frottement l'une sur l'autre.

La commande de cette machine s'opère le plus souvent par deux poulies tournant en sens contraire l'une de l'autre et placées cha-

cune sur l'un des axes. On les dispose ordinairement aux deux extrémités opposées. Ce ventilateur est donc, comme nous le disions plus haut, une véritable pompe rotative ; il peut fouler de l'air jusqu'à $1^m,50$ de hauteur d'eau. La boîte alésée porte une soupape qui règle la limite de pression, enfin au lieu d'être en fonte taillée, la surface des palettes est souvent constituée par du bois paraffiné que l'on enduit de graisse.

Le ventilateur Roots construit par la Société des anciens ateliers Ducommun de Mulhouse, a reçu de nombreuses applications et s'est répandu partout, car c'est le seul qui permette de refouler de l'air à une pression aussi forte que celle qui a été dite. Il est donc précieux dans bien des circonstances.

Turbines-ventilateurs à haute pression. — En même temps que ces essais sur les turbines-pompes à grandes hauteurs d'élévation, couronnés d'ailleurs de plein succès, puisqu'elles sont entrées dans le domaine pratique, la Société suédoise de Laval a entrepris en 1899 une série d'expériences sur les ventilateurs accouplés directement aux arbres principaux des turbines et épousant leur très grande vitesse de 15 à 20.000 tours par minute et au-dessus.

Ici, comme pour les pompes centrifuges, on a pu se rendre compte des idées incomplètes qu'on avait jusque-là sur ces appareils, sur leur mode de fonctionnement et sur le rendement dont ils sont capables.

Lors des premiers essais avec une roue mobile du ventilateur de 200 millimètres de diamètre, l'on a pu faire débiter, à la vitesse de 17.000 tours par minute, $2^m,3$ d'air par seconde avec $2^m,5$ de pression d'eau.

Le rendement du ventilateur dépassait 60 0/0.

Le poids de l'ensemble était de 1.500 kilogrammes.

Il résulte de ces expériences qu'avec des ventilateurs appropriés aux vitesses de la turbine de Laval on peut obtenir des pressions aussi élevées qu'avec des compresseurs à piston, avec des rendements analogues.

Turbines-ventilateurs. — Ces appareils sont constitués par un accouplement direct des turbines avec des ventilateurs centrifuges montés sur une plaque de fondation unique.

Le ventilateur est construit en tôle d'acier emboutie, ce qui le rend très léger tout en lui conservant la robustesse indispensable.

Le disque à ailettes (turbine proprement dite du ventilateur) se fait en fonte ou en bronze. Les ailettes sont en tôle d'acier emboutie, et prises par le bord dans la masse de métal du disque qui est parfaitement équilibré.

Le ventilateur est étudié de façon à réaliser le maximum de rendement mécanique et de pouvoir manométrique. Ce résultat est obtenu grâce à l'emploi d'un tracé spécial des ailes et à l'ad-

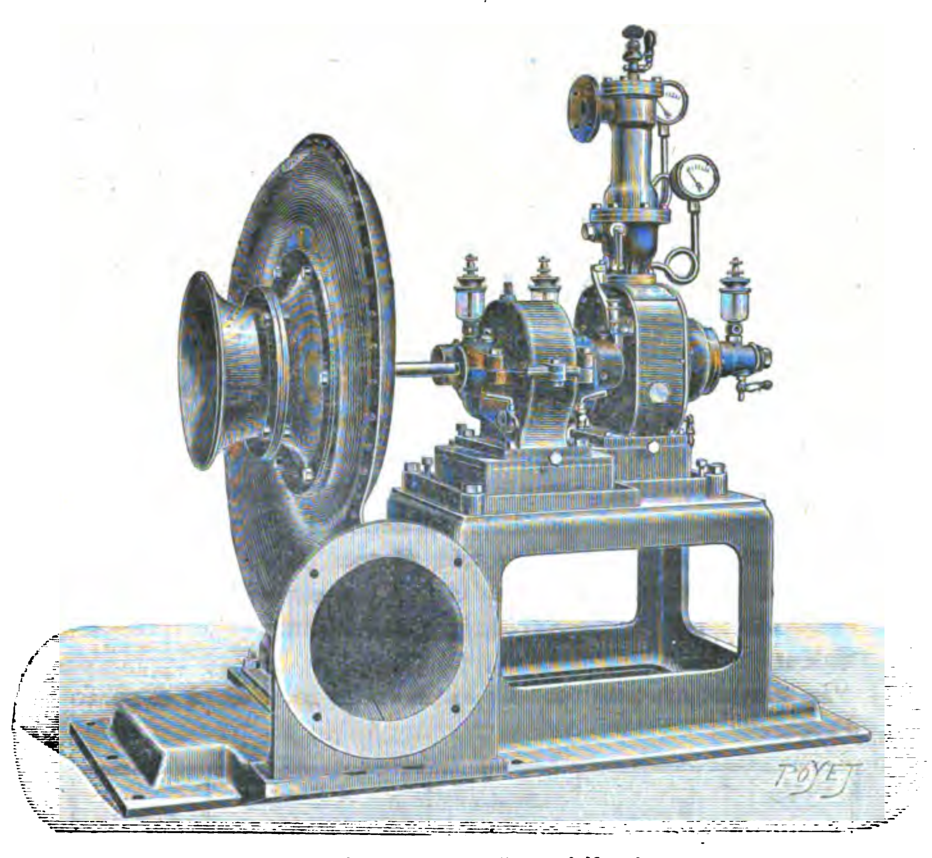


Fig. 128. — Turbo-ventilateur de Laval.

jonction d'un amortisseur plan au diffuseur ordinaire. La surface des ailes est engendrée par un arc de cercle qui se déplace en s'appuyant, d'une part, sur une droite, et d'autre part, sur un deuxième arc de cercle. Le plan de la génératrice reste constamment parallèle à un plan fixe. L'aile découpée dans la surface,

ainsi obtenue, est douée d'une rigidité très grande, grâce à la courbure qu'elle présente en tous sens. La génératrice et la directrice sont, d'ailleurs, déterminées de façon que l'air soit saisi sans choc et qu'il prenne dans le ventilateur des vitesses relatives progressivement croissantes.

Le diffuseur comprend l'amortisseur plan et la volute proprement dite. L'amortisseur plan a pour but d'éviter la perte d'énergie mécanique par frottement des veines fluides les unes contre les autres. Les différentes veines fluides, qui circulent dans la volute et celles qui sortent de l'amortisseur plan, se mélangent avec des vitesses sensiblement égales, de sorte que les chocs sont supprimés.

Ces appareils ont un rendement mécanique élevé (0.70 à 0.75); un pouvoir manométrique égal à 0.90 qui permet de réaliser de grandes dépressions sans atteindre des vitesses périphériques exagérées. Ils fonctionnent silencieusement et peuvent être employés différemment comme aspirants ou refoulants.

Les petits ventilateurs centrifuges conviennent tout spécialement lorsqu'il s'agit de réaliser des pressions s'élevant jusqu'à 300 millimètres d'eau ; ils sont donc tout indiqués pour le soufflage des feux de forge et cubilots et pour souffler dans les conduites de faible diamètre et de grande longueur. Ce dernier cas se présente souvent dans l'aérage secondaire des mines.

Pour réaliser des pressions très élevées, il suffit de grouper deux, ou plusieurs ventilateurs en série. Le rendement de l'ensemble est à peu de chose près, égal au rendement d'un seul ventilateur.

Le tableau suivant résume les données relatives à ce genre d'appareils :

Type de la turbine employée	Diamètre de ventilation	Nombre de ventilateurs en tension	Nombre de tours	Débit par seconde en m³	Pression en m/m d'eau
5 chev.	0m,350	1	3.000	0.900	250
10 —	0 ,500	1	2.400	1 800	250
20 —	0 ,500	2	2.000	1.800	450
30 —	0 ,500	3	2.000	1.800	700

Fixation. — L'arbre proprement dit et l'arbre auxiliaire sont les deux seuls organes en mouvement dans la turbine. Tous deux accomplissent un mouvement de rotation ; ils ne peuvent donc transmettre aucune trépidation au bâti, et, par suite à son assise. Il en résulte qu'il est inutile d'établir un massif de fondation coûteux pour supporter la turbine et la machine à laquelle elle se trouve accouplée.

Nous arrêterons ici la description des machines ayant pour organe principal une roue à aubes ou à palettes animée d'un rapide mouvement de rotation. Nous pensons en avoir dit assez pour montrer quelles sont les propriétés particulières de ce qu'on appelle des turbines et à quelle innombrable variété de travaux ces propriétés permettent de l'appliquer. Moteurs aériens, hydrauliques, à vapeur, pompes à élever l'eau, ventilateurs, etc., tous ces appareils sont basés sur le principe de la turbine, et on a pu se rendre compte, au cours de ce livre, de l'intérêt incontestable que présente ce mécanisme élémentaire qu'est la roue à aubes ou à palettes. Et si, du passé on peut déduire l'avenir, il est à supposer que la turbine, à quelque catégorie qu'elle appartienne, n'a pas dit son dernier mot et qu'elle fera encore longtemps bonne figure dans le monde industriel.

LISTE COMPLÈTE DES BREVETS FRANÇAIS

RELATIFS AUX

MOTEURS ROTATIFS A VAPEUR OU A GAZ TONNANTS

PRIS DEPUIS L'ANNÉE 1900 JUSQU'AU 1er MARS 1904

Année 1900

296023 *Schocke.* — Machine à vapeur rotative.
296000 *Monneret.* — Moteur rotatif.
296297 *Ljüngstrom.* — Moteur rotatif.
296410 *Stilmant et Laduron.* — Nouveau moteur rotatif dit « moteur-revolver ».
296447 *Taylor.* — Moteur rotatif.
296517 *Gaudet, Le Canu et Bergouignan.* — Moteur rotatif à trois pistons supprimant le point mort et la trépidation.
296645 *Essick.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
296840 *Thormeyer.* — Machine rotative à pistons à palettes glissantes.
296792 *Spyker.* — Moteur rotatif à explosions à quatre temps et à double effet pour automobiles.
297239 *Kerwien.* — Machine motrice rotative.
297465 *Bruijuis.* — Moteur rotatif.
297479 *Gravier.* — Turbine thermique.
297643 *Lincoln.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
297871 *Lestrade.* — Moteur à piston rotatif sans point mort.
297692 *Montgomery et Mc Coy.* — Perfectionnements aux machines rotatives.
297907 *Bruckert.*— Moteur rotatif à mouvement louvoyant pour gaz, pétrole, vapeur, etc.
298301 *Tuckfield.* — Perfectionnements dans les machines rotatives.
298391 *Evans.* — Perfectionnements dans les machines rotatives.
298190 *Fryklind et Laestadius.* — Moteur rotatif.
298256 *Petit-Laurent.* — Moteur rotatif à fluide sous pression.
298344 *Cohn et Geisenberger.* — Système de moteur rotatif.
298580 *Meiani.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
298832 *Smith.* — Perfectionnements dans les machines à vapeur rotatives.
298955 *Allenou.* — Nouveau moteur rotatif.
299369 *Dearing.* — Système perfectionné de machine rotative.
299691 *Ahston.* — Perfectionnements aux turbines.
299692 *Parsons. Stoney et Fullagar.* — Perfectionnements apportés aux couronnes et aux aubes des turbines à vapeur.

299567 *Anderson.* — Moteur à piston à mouvement rotatif partiel et rectiligne alternatif continu.
299658 *Headson.* — Système perfectionné de machine rotative.
299688 *Conner.* — Machine rotative.
299705 *Jacomet.* — Aéromoteur.
299882 *Fauchon.* — Moteur léger à hydrogène liquéfié.
300080 *Sukkau.* — Machine rotative à vapeur.
300000 *Ledvina.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
300037 *Legendre.* — Perfectionnements des machines rotatives.
300172 *Clipfel et de Bucy.* — Moteur à piston rotatif étanche.
300390 *Bucquet.* — Système de moteur rotatif à vapeur ou à poudre.
300442 *Desaint et Lemale.* — Turbo-moteur à mélange tournant.
300687 *Berglund.* — Moteur rotatif perfectionné.
300860 *Bottcher.* — Moteur à piston rotatif.
301002 *Grandgenèvre.* — Turbine rotative à vapeur à détente.
300956 *Wilson.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
300972 *Quidarré et Cailleux.* — Moteur tangentiel rotatif.
301391 *Koch.* — Turbine à vapeur.
301400 *Dearing.* — Système perfectionné de moteur rotatif à vapeur.
301305 *Kelly et van Buskirk.* — Système combiné de machine rotative et de modérateur.
301668 *Gaudet, Le Canu et Bergouignan.* — Moteur rotatif alternatif à trois pistons.
301918 *Rateau.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur et à gaz.
301979 *Morin.* — Moteur rotatif.
302235 *Brady.* — Turbine à vapeur.
302247 *Reis.* — Moteur rotatif à vapeur ou autre fluide.
302276 *Morin.* — Système de moteur rotatif à mélange tonnant.
302287 *Annebicque.* — Moteur rotatif.
302337 *Knorring et Nadrowski.* — Procédé pour utiliser dans les turbines le travail moteur de fluides élastiques chauffés par une chaufferie ouverte, avec récupération du calorique du fluide épuisé.
302524 *Dodillet et Bergmann.* — Turbine pour vapeur, eau, gaz.
302565 *Warren.* — Moteur rotatif.
302831 *Cooper.* — Machine à vapeur rotative à marche réversible.
302843 *Cooper.* — Machine à vapeur à rotation directe.
302956 *Taylor.* — Perfectionnements aux machines rotatives compound.
302989 *Bottin.* — Moteur rotatif.
303204 *Eastburgh.* — Machine à vapeur rotative.
303181 *Le Pontois, Charron et Girardot.* — Turbo-moteur.
303533 *Othon.* — Nouveau système de turbine motrice.
303489 *Chevreux.* — Nouveau système de turbine motrice réversible pouvant fonctionner avec n'importe quel fluide sous pression ou en mouvement.
303539 *Messager.* — Turbine à vapeur pouvant fonctionner avec toute espèce de fluide gazeux.

303353 *Bergeron.* — Moteur rotatif.
303479 *Martin.* — Système de machine rotative perfectionnée applicable comme moteur et comme pompe.
303873 *Riegel.* — Dispositif pour la réduction de la vitesse des turbines à vapeur.
304063 *Berthon Frères.* — Moteur à pétrole ou à vapeur, appelé « volvens ».
304327 *Jensen.* — Moteur rotatif.
304294 *Ljungstrom.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
304381 *Dinoire.* — Moteur rotatif magnétique.
304472 *Burlat Frères.* — Nouveau moteur à cylindres tournants.
304502 *Morell.* — Appareil d'étanchéiage pour machines à pistons rotatifs.
304509 *Mc Farlan et Bruckman.* — Moteur à cylindre rotatif.
304561 *Baxter et Dick.* — Perfectionnements aux machines rotatives.
304587 *Iaeger.* — Perfectionnements dans les moteurs à pistons rotatifs.
304626 *Kemble.* — Système perfectionné de turbine à vapeur.
304652 *Morin.* — Moteur rotatif.
304850 *Miralles.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
304973 *Dondey.* — Système de moteur rotatif.
304982 *Lefèvre.* — Nouveau système de moteur à vapeur.
305061 *Humbert.* — Moteur rotatif à vapeur à triple expansion ou plus avec changement de marche et multiplication d'énergie.
305149 *Adler.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
305279 *Dewar Frères.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
305579 *Van Berestein.* — Moteur rotatif.
305693 *Masters.* — Moteur rotatif perfectionné.
305759 *Schulz.* — Dispositif pour compenser entièrement ou en partie la pression axiale effective des turbines à vapeur compound.
305815 *Smith.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
305833 *Le Maréchal.* — Moteur rotatif.
306027 *Pascault et de Coursac.* — Nouveau mode de commande des moteurs à vapeur rotatifs, et appareil à cet effet.
306169 *Rateau.* — Accumulateur générateur de vapeur.
306054 *Becht.* — Système de moteur dit « alterno-circulaire ».
306160 *Krummel.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
306195 *Foucault.* — Turbine à vapeur à foyer rotatif.
306534 *Coleman.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs à explosion.
306496 *Cailletet.* — Moteur thermique à oxygène liquide.
306608 *Crowe.* — Perfectionnements aux machines rotatives.

Année 1901

306830 *Macker.* — Moteur rotatif.
306921 *Rateau et Société Sautter-Harlé.* — Nouveau système de graissage des turbo-moteurs à vapeur.
306974 *Schmid.* — Dispositif de turbine à vapeur.

307138 *Casman.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
307341 *Williams et Stephens.* — Machines rotatives à mouvement réciproque.
307228 *Canisse.* — Moteur alterno-rectiligne circulaire continu à essence de pétrole, gaz ou vapeur
307366 *Marque.* — Moteur dénommé « turbine à gaz et à vapeur ».
307380 *Pichery.* — Moteur rotatif à fluide sous pression et à gaz tonnants.
307655 *Huet.* — Moteur à réaction à vapeur, gaz tonnant ou essence.
307675 *Hoffbaüer et Rudemanu.* — Système d'étanchéité pour le joint entre la roue conductrice et la roue motrice des turbines à gaz ou à liquide.
307941 *Eidel et Hartmann.* — Perfectionnements apportés aux machines rotatives à vapeur.
307968 *Lemale.* — Turbo-moteur à combustion continue intérieure.
308123 *Gautier.* — Turbine à vapeur à marche lente par réaction statique de vapeur surchauffée ou saturée et de capacité variable en marche.
308171 *Guindon.* — Perfectionnements aux machines rotatives à vapeur.
308247 *Van Gelder.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
308624 *Lemoine.* — Perfectionnements dans la construction des turbines à vapeur ou à gaz.
308477 *Zimmermann.* — Moteur thermo-hydraulique.
308505 *Kochendarfer, Hunter et Drury.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
308738 *Marr.* — Moteur rotatif à vapeur pouvant aussi fonctionner comme moteur hydraulique ou comme pompe rotative à eau ou à air.
308785 *Lecellier.* — Système de moteur rotatif.
308789 *Pichery.* — Moteur compound mixte (gaz et vapeur).
308790 *Pichery.* — Moteur rotatif pour tous fluides ou liquides sous pression.
309057 *Krotz, Mlle Anderson et Mme Mac Person.* — Machine à vapeur rotative.
309078 *Messager.* — Nouveau dispositif de disque à aubes pour turbine à vapeur.
309298 *Eidel et Hartmann.* — Système d'étanchéiage des pistons pour machines rotatives.
309290 *Louet.* — Moteur triphasé à essence.
309383 *Société The Northern rotary engine C°.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
309410 *Schulz.* — Dispositif de réglage pour turbines à vapeur.
309555 *Loison.* — Machine à vapeur rotative.
309745 *Craïg et Fleming.* — Perfectionnements aux rotatives à vapeur.
309705 *Stanley.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
309881 *Fullagar.* — Perfectionnements aux turbines à vapeurs et turbo-pompes compound.
309922 *Hardingham.* — Perfectionnements dans les machines rotatives compound à détente multiple.
309901 *Schreck.* — Moteur rotatif à explosions.

309917 *Lamard.* — Moteur à vent perfectionné.
309967 *Mac Duffe.* — Système perfectionné de machine rotative.
310159 *Chavigny.* — Cylindre rotatif.
316224 *Schulz.* — Dispositif permettant de faire travailler économiquement les turbines multiples.
310157 *Bruneau.* — Aéromoteur dit « Hercule ».
311137 *Rateau et Société Sautter-Harlé et Cie.* — Nouveau système de turbine multicellulaire à vapeur ou à gaz, basée sur le principe de l'action.
311232 *Hoffman.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
311192 *Hamann.* — Moteur giratoire à piston.
311298 *Petot.* — Moteur à gaz, à pétrole ou essence, caractérisé par un cycle physique de circulation.
311590 *Bourgarel.* — Turbine à vapeur à haute pression et longue détente.
311627 *Sanderson.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
311943 *Martineau.* — Moteur dit « cyclone » utilisant les fluides compressibles ou incompressibles.
312206 *Stumpf.* — Aubages pour roues-turbines.
312422 *Tygard et Wood.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
312431 *Humbert.* — Moteur aéro-hydrostatique.
312810 *Alsop.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
312856 *Golay.* — Système de moteur rotatif à explosions.
312987 *Dupont.* — Moteur rotatif.
313032 *Michaël.* — Moteur avec ailes de piston coulissables dans le piston rotatif.
313086 *Fayollet.* — Moteur rotatif.
313379 *Courtin.* — Turbo-moteur fonctionnant avec des fluides élastiques.
313466 *Samain.* — Machine rotative motrice ou réceptrice.
313764 *Philippon et Chevallier.* — Moteur rotatif équilibré à détente variable pour le régulateur.
313997 *Von Knorring et Nadrowski.* — Installation pour turbines à vapeur surchauffée.
313875 *Stilmant.* — Moteur rotatif.
314104 *Huet Frères.* — Perfectionnements aux machines à vapeurs rotatives.
314105 *Société Aktienbolaget Broderna Hult Rotationsang maskin.* — Perfectionnements aux machines à vapeur rotatives.
314107 *Martin de Moutte.* — Moteur rotatif.
314577 *Vilain.* — Moteur rotatif pouvant fonctionner à l'aide de fluide sous pression ou de gaz détonants.
314591 *Beckfield.* — Système perfectionné de moteur rotatif.
314688 *Fullagar.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur et turbo-pompes compound.
314742 *Doignon.* — Moteur rotatif.
314759 *Chauveau.* — Moteur universel.
314887 *Gillotin.* — Moteur automatique.

315055 *Dürr.* — Moteur rotatif.
315103 *Sayer.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
315104 *Schulz.* — Moteur rotatif pouvant fonctionner comme pompe.
315143 *Bouriquet.* — Système perfectionné de moteur rotatif.
315297 *Franzen.* — Moteur rotatif.
315312 *Fulton et Richards.* — Moteur atmosphérique.
315465 *Von Knorring et Nadrowski.* — Roues de turbines à grande vitesse en minces plaques de tôle.
315484 *Léger.* — Moteur à piston à course annulaire.
315601 *Von Pittler.* — Machine rotative avec une ou deux courbes planes latérales.
315657 *Bouillon.* — Turbine pouvant fonctionner à l'eau, à la vapeur, au gaz, à l'huile, etc.
315746 *Despiau.* — Moteur sans dépense.
315786 *Stilson.* — Perfectionnements aux machines et pompes rotatives.
315953 *Weston et Tuckfield.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
316001 *Weston et Tuckfield.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
316035 *Le Rond.* — Machine rotative polyphasée.
316034 *Le Rond.* — Nouveau dispositif de changement de marche pour machines rotatives.
316349 *Stumpf.* — Système de régulateur pour turbines à vapeur.
316744 *Herr.* — Système perfectionné de moteur rotatif.
316796 *Butsbach et Hoffbauer.* — Turbine à réaction.
317101 *Fairbanks et Sage.* — Machine rotative.
317115 *Hyde et Vrard.* — Moteur trinité compound à gaz, à pétrole ou à alcool.
317245 *Audouy.* — Système de moteur dit « gyrophile ».
317343 *Thrupp.* — Perfectionnements aux turbines.
317458 *Henricy.* — Moteur rotatif à vapeur.

Année 1902

317580 *Duijsens.* — Machine rotative à vapeur à détente.
317902 *Primat.* — Système de moteur rotatif.
317958 *Bush.* — Perfectionnements aux machines rotatives.
318056 *Thèraizol et Ninbo.* — Moteur *maréodynamique*,
318121 *Meier.* — Moteur à vent à ailes se déplaçant automatiquement.
318359 *Silvestri.* — Moteur à piston rotatif.
318433 *Société de Laval et Maison Breguet.* — Perfectionnements apportés aux turbines à vapeur.
318589 *Sidon.* — Système de turbine à explosion.
318618 *Weichelt.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
318763 *Combe.* — Moteur rotatif perfectionné.
318846 *Wilson.* — Perfectionnement aux moteurs rotatifs.
318981 *Pallé.* — Machine rotative perfectionnée,
319045 *Berthon.* — Moteur équilibré à gaz ou pétrole, pouvant s'appliquer à la vapeur et à l'air comprimé, dénommé le *volvens*.

319162 *Schuppon.* — Moteur rotatif.
319172 *Société Anonyme des Moteurs rotatifs.* — Palette compensatrice pour moteurs rotatifs.
319208 *Zoelly.* — Dispositif régulateur pour turbines à vapeur ou à gaz.
319238 *Massion.* — Système de distribution pour turbines à explosion ou à combustion.
319369 *Fullagar.* — Perfectionnements apportés aux turbines à fluide sous pression et aux appareils servant à la fabrication de certaines de leurs parties.
319370 *Fullagar.* — Perfectionnements apportés aux turbines à fluide sous pression et aux turbo-pompes.
319371 *Fortunesco et Georges.* — Moteur rotatif excentrique.
319531 *Hennebutte.* — Moteur rotatif à gaz, à vapeur ou à air comprimé.
319612 *Darnel et Bosshardt.* — Turbine centripète perfectionnée.
319735 *Moitié.* — Roue à palettes articulées et rotatives pouvant servir de moteur à vent, hydraulique et de propulseur de bateaux.
319746 *Fageot.* — Turbine.
320078 *Pichery.* — Turbine utilisant la force vive des gaz d'échappement des moteurs à gaz ou à vapeur.
320052 *Charpentier.* — Moteur perpétuel.
320546 *Dougherty.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
320563 *Crinon.* — Moteur rotatif à changement de marche.
320689 *Rateau.* — Dispositif de réglage automatique des turbines à vapeur.
320791 *Dabonville.* — Système de moteur rotatif.
320796 *De Bonnechose.* — Turbo-moteur à combustion continue.
320826 *Société Mc Millan engine et machine C°.* — Nouvelle machine rotative à vapeur ou autres fluides.
320929 *Goubaux.* — Système de moteur rotatif à réacteur mobile.
321140 *Igel.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
321196 *Reuter.* — Dispositif régulateur pour turbines à vapeur et à gaz.
321620 *Draper, Carter et Bayliff Frères.* — Perfectionnements apportés aux moteurs rotatifs à fluide sous pression et applicables également aux pompes.
321637 *Mc Collum et Forster.* — Perfectionnements apportés aux machines à turbines.
321739 *Société Parsons.* — Perfectionnements apportés aux aubes de turbines à vapeur.
321943 *Bamford.* — Perfectionnements aux moteurs à vent.
322077 *Rateau.* — Roues mobiles en tôlerie pour turbines à vapeur ou à gaz.
322125 *Fouques Frères.* — Turbine à vapeur compound à triple et quadruple expansion.
322756 *Patschke.* — Machine à vapeur à piston rotatif.
322779 *Fleming.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs et à leurs distributeurs.
322926 *Cardosa.* — Moteur rotatif pour la production du mouvement circulaire continu.

322947 *Blot.* — Turbino-moteur à gaz tonnant et hélices opposées.
323178 *Gross.* — Turbine à vapeur ou à gaz.
323260 *Moyon.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
323282 *Zoelly.* — Installation de turbines à gaz de combustion.
323285 *Gross.* — Procédé pour augmenter le rendement des turbines à vapeur.
323338 *Gillotin.* — Moteur automatique.
323400 *Loumiet.* — Moteur utilisant l'énergie calorique de l'atmosphère.
323620 *Soria y Hermandez.* — Nouveau moteur à vent.
323721 *Hagerty.* — Moteur rotatif.
323812 *Schuler et Haffeltranger.* — Turbine pour fluides élastiques.
323933 *Pickett.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
324116 *Martinval.* — Moteur rotatif absolu et alternatif relatif.
324147 *Lindmark.* —Turbine pour agents moteurs élastiques.
324726 *Société Mc Millan engine.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
324802 *Jones.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
324837 *Schenber.* — Perfectionnements apportés aux turbines à gaz, à vapeur, hydrauliques et similaires.
324937 *Schnabel.* — Roue à vent.
324986 *Volker et Prügel.* — Moteur à piston rotatif.
325230 *Patschke.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
325466 *Craig et Fleming.* — Perfectionnements apportés aux machines à vapeur rotatives.
325634 *Phifer et Blakmann.* — Machine rotative.
325713 *Mills.* — Machine à vapeur rotative.
325804 *Okun.* — Moteur rotatif à gaz ou à pétrole.
325873 *Dünn et Jackson.* — Moteur rotatif.
325921 *Société The Butler turbine engine Co.* — Perfectionnements dans les moteurs rotatifs.
325989 *Jamieson.* — Nouveau système de moteur rotatif.
326183 *Sérullas.* — Volant automoteur à mélange tonnant.
326336 *Société Nicholson Gépyar, etc.* — Moteur rotatif.
326650 *Lemalle.* — Turbo-moteur à combustion continue intérieure.
326646 *Johnson.* — Moteur rotatif à piston tournant.
326748 *Octiker.* — Moteur rotatif.
326940 *Wood.* — Moteur rotatif.
326952 *Olivier.* — Moteur rotatif.
327258 *Mazières.* — Turbine à vapeur.
327396 *Kingsburg.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
327600 *Ingham.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
327626 *Pickel.* — Moteur rotatif.
327708 *De Walden et Knudsen.* — Perfectionnements à la construction des turbines et moteurs du même genre.
327801 *Cumming.* — Système de turbine.
327888 *Allen.* — Perfectionnements aux machines rotatives.
327929 *Bizet.* — Machine universelle rotative.

Année 1903

328319 *Revault.* — Perfectionnements dans l'emploi de la vapeur pour les moteurs qui en utilisent la force vive (turbo-moteurs).
328516 *Berthier.* — Nouveau système de moteur rotatif.
328568 *Lecomte et Mizzi.* — Moteur rotatif à simple et à double expansion.
328705 *Couttolenc.* — Moteur rotatif.
328920 *Mc Arthur et Smith.* — Moteur rotatif.
329199 *Edwards.* — Machine à vapeur rotative.
329205 *Marth.* — Turbine.
329285 *Schaller.* — Dispositif économique de cylindre avec piston-valve pour moteur rotatif silencieux.
329550 *Stumpf.* — Turbine à vapeur avec roue à aubage double.
329551 *Stumpf.* — Turbine à vapeur ou à gaz pouvant tourner à des vitesses différentes.
329552 *Stumpf.* — Turbine à vapeur avec deux roues mobiles tournant en sens contraire.
329553 *Stumpf.* — Turbine à vapeur.
329554 *Stumpf.* — Turbine à vapeur ou à gaz pourvue de plusieurs systèmes de roues mobiles et de roues directrices.
329666 *Fournier.* — Machine à mouvement rotatif indéfini.
329715 *Roger.* — Nouveau système de turbines à vapeur.
329826 *Astier.* — Moteur rotatif.
329829 *Fakin.* — Moteur rotatif.
330266 *Hennebutte.* — Moteur rotatif à détente complète, pour air comprimé, vapeur ou mélange tonnant.
330027 *Chapman.* – Moteur rotatif.
328011 *Bagilet.* — Machine à vapeur rotative.
330518 *Wiechmann.* — Système de moteur rotatif ou pompe.
330606 *Pallé.* — Machine rotative.
330652 *André.* — Moteur rotatif à explosions.
328024 *Dubois.* — Moteur rotatif.
330803 *Girard Fils.* — Moteur rotatif à acide sulfureux liquide.
331126 *Société American Perfection engine C°.* — Moteur rotatif à vapeur.
331127 *Chevalier.* — Moteur rotatif à gaz, pétrole, alcool, pour automobiles et autres usages.
331133 *Corinaldesi.* — Turbine à vapeur ou à gaz complète avec admission partielle.
331194 *Webster.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
331214 *Parsons.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
331231 *Piguet et Cie.* — Perfectionnements aux turbines aérodynamiques.
331292 *De Bonnechose.* — Turbo-moteur à combustion continue.
331305 *Sauzereau et Tavernier.* — Moteur rotatif.
331408 *Jolicard.* — Perfectionnements et dispositions nouvelles applicables aux turbines à vapeur à expansion multiple.
331415 *Van Bereystein.* — Moteur rotatif à détente variable pour came.

331465 *Olevin.* — Moteur à piston rotatif.

331526 *Emmet.* — Turbine.

331539 *Société Turbine Continental C°.* — Turbine à fluide élastique.

331540 *Société Turbine Continental C°.* — Ajutages ajustables pour turbines à fluides élastiques.

331541 *Société Turbine Continental C°.* — Outil à tailler les aubes pour turbines à fluides élastiques.

331542 *Dodge.* — Support pour aubes intermédiaires dans les turbines à fluides élastiques.

331543 *Junggren.* — Mécanisme régulateur pour turbines à fluides élastiques.

331546 *Société Turbine Continental C°.* — Régulateur électrique pour turbines à fluides élastiques.

331639 *Duysens et Klynen.* — Machine à vapeur rotative à détente ou variable et réglable.

331949 *Schenck, Bittner et Westenfelder.* — Perfectionnements aux turbines.

331950 *Société Gesellschaft zur einfuhrung von Erfindungen mit Beschrankter Aftung.* — Dispositif d'injection pour turbines à vapeur à nombre de tours variable.

331970 *Morell.* — Machine rotative.

335989 *Latzel.* — Turbine à explosions.

322037 *Société Gesellschaft, etc.* — Moyen de parer aux inconvénients des dilatations inégales dans les roues de turbines à vapeur.

322126 *Chleq.* — Moteur rotatif à explosions.

322395 *Cameron et Woollen.* — Moteur rotatif.

332454 *Kugel et Gelpke.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur ou à gaz à chargement radial.

332466 *Marck.* — Moteur à fluide.

332476 *Demont.* — Machine rotative à pistons, fonctionnant à la vapeur, à l'air comprimé, aux gaz d'explosion et servant de pompe.

332478 *Allen.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.

332641 *Pichery.* — Méthode et appareil pour la production économique de force motrice par la transformation en force vive de la chaleur des fluides.

332725 *Société Westinghouse.* — Nouvelle turbine à vapeur.

332750 *Smith.* — Perfectionnements dans les machines rotatives.

332849 *Thormeyer.* — Turbine à vapeur.

332892 *Société International Sheahan rotary engine C°.* — Machine rotative.

333083 *Andrews, Hafner et Woodworth.* — Moteur rotatif.

333102 *Wright.* — Moteur centrifuge.

333138 *Société Westinghouse.* — Perfectionnements dans les turbines à pression de fluides.

333154 *Société Piguet et Cie.* — Perfectionnements aux turbines aérodynamiques.

333253 *Heillmann (Dame).* — Turbine à marche réversible.
333282 *Benson.* — Moteur rotatif.
333331 *Gracey et Gerken.* — Moteur rotatif.
333477 *Van Everen.* — Moteur à hydrocarbure réversible.
333760 *Société Breguet.* — Aubes distributrices de turbines à vapeur à disques multiples.
333775 *Société Ges. Beschrankter Haftüng.* — Méthode pour le travail en cascade des turbines à pression.
334055 *Nass.* — Moteur rotatif.
334120 *Petit.* — Machine rotative à vapeur et hydraulique.
334129 *Société Ges. mit Beschrankter Haftung.* — Méthode et turbine pour l'utilisation en cascade de la vapeur et des gaz.
334210 *Vilchez-Godoy.* — Moteur rotatif à air chaud.
334239 *Wilkinson et Unrath.* — Régulateur pour turbines à fluides élastiques.
334601 *Lees.* — Perfectionnements dans les turbines.
334631 *Günther.* — Moteur auto-régénérateur.
334641 *Bougarel.* — Turbine hydraulique et à vapeur.
334670 *Small.* — Système d'entraînement pour turbines et autres moteurs rotatifs et appareil à cet usage.
334716 *Smalbone.* — Machine rotative à pistons multiples.
334873 *Mattocks et Grafflin.* — Machine à vapeur rotative.
335007 *Von Pittler.* — Système de moteur rotatif.
335074 *Stephan.* — Distribution pour machines rotatives.
335081 *Société Westinghouse.* — Perfectionnements dans la commande des soupapes pour moteurs à fluide sous pression.
335123 *Société des Etablissements Postel-Vinay.* — Aubes détachables pour turbines à vapeur.
335321 *Société des Etablissements Postel-Vinay.* — Perfectionnements à la construction des turbines à fluide élastique.
335323 *Société des Etablissements Postel-Vinay.* — Perfectionnements aux turbines à fluide élastique.
335333 *Bauermeister.* — Turbine à vapeur.
335386 *Nordenfeldt.* — Perfectionnements aux moteurs rotatifs.
335447 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements aux turbines à fluide élastique.
335553 *Farner et Cie.* — Moteur rotatif.
335572 *Jolliffe et Coulthard.* — Système de moteur rotatif.
333784 *Nestius et Nordlinck.* — Moteur rotatif.
335820 *Terry.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
335918 *Société Postel-Vinay.* — Turbines à fluides élastiques.
335939 *Roth.* — Moteur rotatif à vapeur, gaz ou eau, pouvant faire office de pompe ou ventilateur.
335962 *Lindmark.* — Procédé pour soulager les turbines compound de la pression axiale.
336216 *Fageot.* — Nouveau moteur rotatif dit *turbine universelle.*

336320 *Société Postel-Vinay.* — Machine à tailler les aubes de turbines.

336322 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements apportés à la construction des aubes de turbines.

336323, 324, 325, 326, 327, 328, 329 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements aux divers organes des turbines à vapeur.

336420 *Mortier.* — Perfectionnements dans le système de fonctionnement des turbo-machines.

336459 *Dupont.* — Moteur rotatif.

336599 *Reuter.* — Couronne d'aubes directrices pour turbine.

336623 *Société Aktiebolaget de Laval-Augsturbin.* — Dispositif régulateur pour turbines à vapeur.

336691 *Liebetanz.* — Moteur rotatif.

336780 *De Broussouze.* — Turbo-moteur à explosions intermittentes à air carburé.

336878 *Osvetimsky.* — Moteur rotatif.

336935 *Schmuker.* — Moteur rotatif à vapeur.

337078 *Philippon et Chevalier.* — Moteur rotatif à grande vitesse sans point mort.

337128 *Hula.* — Moteur rotatif.

337132 *Arbogast et Guérard.* — Moteur rotatif à explosion à quatre temps.

337187 *Holzwarth.* — Turbine à cloisons et tuyères fixes réglables.

337288, 289, 290, 291, 292 *Société des Etablissements Postel-Vinay.* — Perfectionnements dans la construction des organes de turbines à vapeur.

337293 *Durand.* — Machine rotative pour la transformation de la calorie en travail mécanique.

337357 *Compagnie de Fives-Lille et Ribourt.* — Turbo-transformateur hydrodynamique.

337362 *Dufour.* — Turbine à vapeur.

337461 *Reuter.* — Commande électromagnétique des organes d'admission des turbines à vapeur et à gaz.

337552 *Thémar.* — Moteur rotatif à détente à double effet et à changement de marche.

337558 *Holzwarth.* — Palier de turbine.

337559 *Holzwarth.* — Roue de turbine.

337937 *Dailey.* — Moteur rotatif.

337962 *Koch.* — Nouveau moteur rotatif.

337978 *Belle.* — Nouveau moteur rotatif.

338017 *Arzt.* — Machine à vapeur rotative.

338058 *Stubbs.* — Moteur rotatif.

338082 *Laurue.* — Moteur rotatif.

338244, 245, 246, 253 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements aux turbines et à leurs organes.

338301 *Richir.* — Turbine à vapeur avec disque mobile à pistons étanches, à simple ou multiple expansion et à puissance réglable par le régulateur ou à la main.

338309 *Braun.* — **Turbo-moteur à combustible liquide applicable aux automobiles, canots, etc.**
338332 *Schwager.* — **Moteur rotatif.**
338567 *Compagnie de Fives-Lille.* — Perfectionnements aux turbines à vapeur.
338629 *Société General Electric C°.* — Perfectionnements aux paliers des turbines à fluides élastiques.
338638 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements apportés aux turbines à fluides élastiques.
338675, 693, 710, 711, 715, 716, 718, 751 *Société Postel-Vinay.* — Perfectionnements divers aux turbines et à leurs divers organes.
338695 *Fahlbeck.* — Perfectionnements apportés aux machines à vapeur rotatives.
338732 *Buchholtz.* — Perfectionnements apportés aux machines rotatives à vapeur et autres forces motrices.
338747 *Jullien.* — Pompe ou moteur rotatif.

Année 1904

338762 *Lecaime.* — Moteur dénommé le *rotatif équilibré.*
339363 *Holmgren.* — Turbine à vapeur duplex.
339415 *de Bonnechose.* — Récepteur rotatif pour vapeur, gaz, etc. et pouvant servir de compresseur de gaz.
339489 *Zahikjanz.* — Turbine à vapeur.
339556 *Mc Collum et Forster.* — Perfectionnements apportés aux turbines.
339640 *Martinez et Nicolle.* — Turbine à vapeur à auget et à contre-auget fixe d'admission.
339677 *Masters.* — Turbine à vapeur ou moteur rotatif perfectionné.
339773 *Durand.* — Machine rotative pour la transformation de la calorie de combustion des hydrocarbures liquides en travail mécanique.
339804 *Sachers.* — Perfectionnements aux turbines radiales.
339847 *Hackel.* — Turbine à gaz.
339962 *Aubert.* — Genre de turbine motrice pouvant tourner dans les deux sens et à vitesse variable.
340104 *Société The Hooven, Owens Rentschler et C°.* — Perfectionnements apportés aux turbiues.
340197 *Allen.* — Perfectionnements aux machines à vapeur rotatives.
340245 *Westinghouse.* — Perfectionnements dans les turbines à fluides sous pression.
346268 *Westinghouse.* — Perfectionnements aux turbines, etc.
340271 *De la Bate.* — Moteur à cylindre animé d'un mouvement rotatif.
340292 *Mederer.* — Moteur rotatif à détente multiple.
340306 *Westinghouse.* — Perfectionnements dans les turbines.
340465 *Taylor.* — Turbine à vapeur ou autres fluides élastiques.
340366 *Brunel.* — Turbine à explosions.

340657 *Société The Imperial Engineering C° of Guernesey.* — **Perfectionnements aux turbines.**

340644 *Lanning.* — **Perfectionnements aux turbines à fluides expansibles.**

Cette liste, qui montre quelle importance a pris la question des moteurs à rotation directe et turbo-moteurs à vapeur ou à gaz tonnants, s'arrête à la date du 1er mars 1904.

L'auteur reste à la disposition de ses lecteurs pour leur procurer, le cas échéant, le texte imprimé ou la copie de l'un ou de l'autre de ces brevets susceptibles de les intéresser. En cas de nouvelle édition, cette liste sera complétée et tenue à jour.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

Pages

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MACHINES TOURNANTES EN TOUS GENRES 1

CHAPITRE II

LES TURBO-MOTEURS ATMOSPHÉRIQUES

L'*Eclipse*, de Vidal-Beaume 8
Aéromoteur Durey-Sohy 12
Moteurs américains 13
Moulin à vent *Star* 14
Turbine aérienne Bollée 16
Applications des turbines atmosphériques 20

CHAPITRE III

LES TURBO-MOTEURS HYDRAULIQUES

Turbines centripètes. — Meilleur rendement mécanique 27
Turbines de grande puissance 29
Turbines multiples. — Turbines sur hautes chutes, roues Pelton . . . 32
Réglage de la vitesse de rotation des turbines 34
Autres systèmes de réglage 37
Régulateur Woodward 38

CHAPITRE IV

LES TURBINES HYDRAULIQUES MODERNES

Turbines Jonval-Kœchlin 43
Fontaine et Girard 44
Turbine centripète *Hercule-Progrès* 46

Pages

Roue-Turbine *Excelsior* 52
Autres modèles de turbines 55
Beyer 57
Turbines centripètes Gandillon 58
Moteurs hydrauliques et régulateurs de Neyret-Brenier et Cie 60
Turbines *América* 66
Turbines Bouvier 73
Luther 76
Royer et Jolly, Petits moteurs 77

CHAPITRE V

LES MACHINES ROTATIVES A VAPEUR

Moteur Uhler 84
Moteur rotatif Bambel 89
Machine Behrens. 89
Moteur hélicoïdal Filtz. 91
Moteur épicycloïdal Gérard 93

CHAPITRE VI

LES MACHINES ROTATIVES RÉCENTES

Moteur d'Arbel-Tihon 97
Moteur rotatif Ghersi 100
Moteur à détente Henry 102
Moteur Hult 103
Machine rotative de Sullivan. 107

CHAPITRE VII

HISTORIQUE ET THÉORIE DES TURBINES A VAPEUR

Historique du turbo-moteur 121
Applications des turbo-moteurs 124

CHAPITRE VIII

LA TURBINE DE LAVAL

Théorie. 125
Tableau d'essai de turbines 129
Description du mécanisme. 130

Pages
Tableau de consommation 186
Turbines-dynamos et turbines-moteurs 187
Améliorations récentes à la turbine Laval. 188
Tableaux d'essais de consommation. 189
Utilisation des hautes pressions et surchauffes. 140
Tableau d'essais au frein 142
Turbines Compound. 144

CHAPITRE IX

LA TURBINE A VAPEUR DE PARSONS

Régulation 152
Rendement. 157
Influence de la surchauffe. 164
Ateliers de construction de turbines Parsons de Baden (Suisse). . . . 165

CHAPITRE X

LE TURBO-MOTEUR PARSONS DANS LA MARINE

Le torpilleur la *Turbinia*. 160
La cavitation 172
Essais de la *Viper* 177 180
Le *King-Edward* 182
Avantages et inconvénient des turbines motrices 188

CHAPITRE XI

LA TURBINE RATEAU ET SES APPLICATIONS

Utilisation des vapeurs d'échappement intermittentes. 196
Avantages économiques 198
Essais du torpilleur *Yarrow*. 206 208
Turbine à vapeur de Curtis 209
Turbine Riedler Stumpf 212
Turbine à vapeur Westinghouse 214

CHAPITRE XII

LES TURBO-MOTEURS A GAZ TONNANTS

Moteur alterno-rotatif Auriol. 216
Arnaud-Marot. 218
Ulenluth 219

Pages
Moteur rotatif Chaudun 221
André Betz. 223
Turbine Warmont 225
Volant-moteur Séjà. 226
Moteur alterno-rotatif Primat. 228
Tableau d'essais. 231
Machine rotative Münch 232
Moteur rotatif Golay 232

CHAPITRE XIII

TURBO-MACHINES DIVERSES

Pompes centrifuges 236
Turbines-pompes à vapeur de Laval 238
Pompes centrifuges à haute pression de Laval 243
Pompes rotatives. 245
Turbo-propulseur Marchand 247
Pompe rotative bihéliçoide Gelée 252
Pompe à haute pression Sulzer 253
Pompes radiales. — Ventilateurs centrifuges. 256
Ventilateurs d'Anthonay 259
Ventilateurs Fouché. 260
Ventilateur Roots 261
Turbo-ventilateurs 262
Liste des brevets français relatifs aux moteurs rotatifs à vapeur, à gaz tonnant, délivrés depuis l'année 1900 267
Tables 279

TABLE DES FIGURES

Fig.
1. — Aéromoteur Vidal-Beaume « l'Éclipse ». 9
2. — Mécanisme du moulin automoteur Halladay 13
3 et 4. — Turbine aérienne Halladay 14
5. — Aéromoteur ou turbine atmosphérique « Star ». 15
6. — Aéromoteur de Bollée 17
7. — Schéma du mécanisme de Bollée 18
8. — Aéromoteur « Hercule » de Bruneau d'Oran 19
9. — Hydro-tachymètre régulateur 34
10. — Ajutage de l'hydro-tachymètre. 35
11. — Turbine avec régulateur hydro-tachymètre Ribouro. 36
12. — Autre système de réglage 37
13. — Régulateur Woodward 39
14. — Mécanisme du régulateur Woodward 40
15. — Coupe d'une turbine Jonval 44
16. — Turbine Girard. 45
17. — Turbine « Hercule-Progrès » à axe vertical 47
18. — Turbine « Hercule-Progrès » à axe horizontal. 49
19. — Roue-turbine pour hautes chutes. 50
20. — Roue-turbine à axe horizontal « Excelsior » 53
21. — Turbine hydraulique Francis à régulateur. 56
22. — Turbine des ateliers de Vevey (Coupe) 57
23. — Turbine « normale » de Laurent et Collot 58
24. — Turbine Gandillon, avec servo-modérateur Vigreux 59
25. — Turbine centripète Neyret-Brenier 60
26. — Coupe d'une centripète ou mixte Neyret-Brenier. 61
27. — Roue cloisonnée pour turbines Fourneyron 62
28. — Roue à aubes pour turbine centripète à admission partielle, de Neyret-Brenier et Cie. 63
29. — Turbine centripète à huche spiraloïde 64
30. — Turbine hélico-centripète avec régulateur 65
31. — Turbine « America » pour hautes chutes 68
32. — Turbine « America » pour basses chutes 69
33. — Roue Pelton pour hautes chutes, de Sloan et Cie. 72
34. — Mécanisme d'une turbine Luther. 75
35. — Roues mobiles de turbines Francis de Luther. 76
36. — Moteur hydraulique Dufort dit turbine Humblot. 78
37 et 38. — Moteur Cassel (coupes) 79
39. — Moteur rotatif à vapeur Uhler (coupe). 86
40. — Machine rotative Braconier. 87
41 et 42. — Machine rotative Brown et son piston 88
43 et 44. — Moteur rotatif Bambel. 89
45. — Machine rotative à vapeur de Behrens 90
46 et 47. — Moteur rotatif Filtz (coupes). 92
48. — Coupe du moteur Arbel-Tihon. 97

Fig.
49 à 53. — Détails du moteur Gheroi 101
54 et 55. — Moteur à détente de Henry 102
56, 57, 58. — Détails du moteur Hult. 105
59. — Coupe d'une machine compound Sullivan. 108
60 et 61. — Paliers à rouleaux. Machine marine. 109
62. — Turbine à vapeur Laval. 128
63. — Roue mobile de la turbine Laval. 130
64. — Roues hélicoïdales de transmission. 130
65 à 68. — Principaux organes de la turbine Laval 131
69. — Roue motrice avec son arbre, 70 à 75 pièces diverses. . . . 132
76. — Flasque de la turbine Laval 133
77. — Turbine Laval accouplée à une dynamo. 141
78. — Turbine Laval actionnant deux dynamos 144
79. — Coupe longitudinale de la turbine Parsons 148
80. — Coupe des roues à aubes de la turbine Parsons 149
81. — Régulateur de la turbine à vapeur Parsons. 151
82. — Premier type de turbine Parsons. 153
83. — Turbo-alternateur Parsons-Brown-Boveri 155
84. — Vue d'une station électrique avec turbo-alternateurs 158
85. — Turbo-moteur Parsons de 300 chevaux. 160
86. — Vue de l'atelier de montage des turbines à vapeur Parsons aux usines de Baden (Suisse). 163
87. — Turbine Parsons et alternateurs premier modèle. 170
88. — Le premier bateau à turbo-moteur la *Turbinia*. 173
89, 90, 91. — Coupes d'une turbine à vapeur Rateau. 190
92. — Turbine Rateau accouplée à une dynamo. 194
93. — Turbine à vapeur Curtis. 211
94 et 95. — Moteur rotatif Auriol 217
96 et 97. — Détails du moteur Auriol 218
98. — Moteur Ulenluth 220
99, 100 et 101. — Moteur Chaudun et détails du mécanisme 222
102 et 103. — Moteur rotatif Betz. 224
104. — Turbo-moteur Warmont. 225
105. — Volant-moteur Séja. 226
106. — Plan du volant-moteur. 227
107 à 111. — Moteur alterno-rotatif Primat 229
112, 113, 114. — Pompes centrifuges 236
115. — Pompe centrifuge à commande électrique. 238
116. — Turbine-pompe de Laval. 243
117 et 118. — Pompe centrifuge Poillon 244
119. — Pompe centrifuge Marchand-Bey. 248
120. — Pompe bihélicoïde Gelée 253
121 et 122. — Pompe multiple centrifuge Sulzer. 254
123. — Pompe à réaction radiale 256
124 et 125. — Ventilateur centrifuge 257
126 et 127. — Ventilateur Rootz (coupes) 261
128. — Turbo-ventilateur de Laval. 263

COURBEVOIE

IMPRIMERIE E. BERNARD

14, RUE DE LA STATION, 14

BUREAUX A PARIS : 29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS


89090524752
b89090524752a